

TRABAJO DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

USO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN DFA PARA LA REDUCCIÓN DE CARGAS DE ENFRIAMIENTO



Memoria y Anexos

Autor: Anthony Raúl Ravello Cortez
Director: Alfredo Guardo Zabaleta
Convocatoria: Enero 2017

Resum

En el present projecte es basa en l'estudi paramètric d'una doble façana acristalada (DFA) tancada sense ventilació amb l'objectiu de determinar la configuració òptima. D'aquesta manera s'aconsegueix una disminució en els costos tant de refrigeració com d'il·luminació, i es manté el confort dels ocupants.

Un altre objectiu que s'intenta aconseguir en aquest treball és si mitjançant la circulació d'aigua a l'interior de les persianes s'aconsegueix augmentar la temperatura d'aquesta ja sigui per a l'obtenció d'aigua calenta sanitària (ACS) o si s'arriba a l'evaporació, a la generació d'energia elèctrica.

Per a dur a terme aquest estudi s'han utilitzat els següents programes; AutoCad 2014 (dibuix 3D); Gambit (mallat); i el Fluent 16.0 (simulació CFD). A partir dels resultats obtinguts s'ha prosseguit a l'extracció d'oportunes conclusions i possibles futures millores.

Resumen

En el presente proyecto se basa en el estudio paramétrico de una doble fachada acristalada (DFA) cerrada sin ventilación con el objetivo de determinar la configuración óptima. De esta manera se consigue una disminución en los costes tanto de refrigeración como de iluminación, y se mantiene el confort de los ocupantes. Otro objetivo que se intenta conseguir en este trabajo es si mediante la circulación de agua en el interior de las persianas se consigue aumentar la temperatura de ésta ya sea para la obtención de agua caliente sanitaria (ACS) o si se llega a la evaporación, a la generación de energía eléctrica.

Para llevar a cabo dicho estudio se ha usado los siguientes programas; *AutoCad 2014* (dibujo 3D); *Gambit* (mallado); y el *Fluent 16.0* (simulación CFD).

A partir de los resultados obtenidos se ha proseguido a la extracción de oportunas conclusiones y posibles futuras mejoras.

Abstract

The present Project it's base don the parametric study of a Double Skin Façade (DSF) closed without ventilation in order to determine the optimal configuration. In this way a reduction in the costs of both cooling and lighting is achieved, and the confort of the occupants is maintained. Another objective that we try is to know if bymeans of the wáter circulation in the interior of the blinds it's posible to increase the temperature of this one. With that we can obtain sanitay hot wáter or when it arrives to the evaporation, to the generation of electrical energy.

The following programs were used to obtain results: AutoCaD 2014 (3D drawing); Gambit (meshing); and Fluent 16.0 (CFD Simulation).

From the results obtained, we have proceeded to the extraction of appropriated conclusions and posible future improvements.



Glossario

c_p	Calor específico
g	Gravedad
k	Conductividad térmica
h	Coeficiente de transferencia de calor
L	Longitud característica
p	Presión
\dot{Q}	Calor
\dot{q}	Calor por unidad de área
u	Velocidad
t	Tiempo
T	Temperatura
α	Absorsividad
ρ	Reflectividad
π	Transmisividad
ε	Emisividad
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Tensión de corte
μ	Viscosidad dinámica
ν	Viscosidad cinemática
ϵ	Rugosidad de la superficie
I	Irradiancia
U	Factor de transferencia de calor
R	Resistencia térmica
D_h	Diámetro equivalente

Números adimensionales

Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
Gr	Número de Grashof



Índice

RESUM	I
RESUMEN	II
ABSTRACT	III
GLOSSARIO	V
INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivos generales	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
1.2. Alcance y limitaciones	5
METODOLOGÍA UTILIZADA	6
SOSTENIBILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN	7
1.3. Introducción	7
1.4. Concepto de Sostenibilidad y Construcción sostenible	8
1.5. Política energética en Europa	9
INTRODUCCIÓN A LA DFA	11
1.6. Historia	11
1.7. Definición de la DFA	14
1.8. Aspectos técnicos de la DFA	14
1.9. Ventajas e inconvenientes de la DFA	17
1.9.1. Ventajas	17
1.9.2. Inconvenientes	17
TRANSMISIÓN DE CALOR EN EDIFICIOS	18
1.10. Introducción	18
1.11. Fundamentos de transferencia de calor	19
1.11.1. Conducción	20
1.11.2. Convección	21
1.11.3. Radiación	25
1.12. Transferencia de calor a través de nuestra fachada de estudio (Análisis matemático)	27
1.12.1. Fachada de vidrio simple	32

1.12.2. Fachada de vidrio doble	34
1.12.3. Doble fachada de cristales simples.....	38
1.12.4. Doble fachada con cristal exterior simple y doble interior	39
1.12.5. Comparación de los 4 casos.....	41
1.13. Balance de energía de la DFA (Caso de estudio).....	47
ESTRATEGIA DE SIMULACIÓN	49
1.14. Introducción.....	49
1.15. Configuración del caso base	50
1.15.1. Características geográficas	51
1.15.2. Geometría	51
1.15.3. Mallado	52
1.15.4. Materiales y propiedades	53
1.15.5. Condiciones de contorno.....	53
1.15.6. Configuración numérica del Solver.....	55
1.15.7. Configuración de la calculadora Solar	56
RESULTADOS	57
1.16. Resultados obtenidos del caso base	57
1.17. Variaciones del Caso Base (Estudio paramétrico).....	59
1.17.1. Variación del volumen de la cavidad	59
1.17.2. Variación de la reflectividad	61
1.17.3. Variación del número de Reynolds en las persianas.....	63
1.17.4. Variación de la emisividad del cristal interior.....	65
1.17.5. Comparación con una doble fachada con cristal interior doble	67
1.18. Resumen de los resultados obtenidos	68
CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFIA	71
Referencias bibliográficas.....	71
Bibliografia complementària	72
ANEXO	75
A1. Resistencia térmica de un cristal común.....	75
A2. Determinación de las propiedades ópticas entre vidrios	76
A3. Números adimensionales	77
A4. Determinación de la velocidad del agua en las persianas	78
A5. Determinación del calor absorbido por el agua en las persianas.....	79

A6. Costes del proyecto de Ingeniería	80
PLANOS	81
Plano del Caso Base (pág. 82)	81
Plano del volumen 2 (pág. 83)	81
Plano del volumen 3 (pág. 84)	81

Lista de ilustraciones

Figura 1: Emisiones de contaminantes y uso de recursos en el sector de la construcción (Isover & Gobain, 2010).	7
Figura 2: Second Leiter, construido por Levi Leiter en 1891 (Chicago).	11
Figura 3: Hallidie Building (Sant Francisco). Es considerado el primer muro cortina de Estados Unidos.	12
Figura 4: Occidental Chemical Center 1980 (Canadá). Es el primer edificio construido con doble fachada acristalada por los arquitectos Helmuth, Obata y Kassabaum. A la derecha se muestra la ventilación de la cavidad.	13
Figura 5: Galeries Lafayette (Berlín), construido por Jean Nouvel en 1995.	13
Figura 6: Edificio de New York Times. Este edificio dispone de persianas formadas por tubos cerámicos que proporcionan sombra al edificio y actúan como colector solar.	16
Figura 7: Torre Agbar. Formado por 34 plantas con un total de 145 metros de altura. Finalizado el 16 de septiembre de 2005 por el Grupo Agbar.	16
Figura 8: Dependiendo del clima exterior, las aperturas de ventilación de la cavidad tendrán una forma u otra.	16
Figura 9: Mecanismos de transferencia de calor. En este caso, la pared adquiere calor por conducción y lo libera por radiación y convección.	19
Figura 10: Transferencia de calor por conducción que va desde el lado más caliente al más frío.	20
Figura 11: Transferencia de calor por convección.	21
Figura 12: Condición de no deslizamiento. El fluido disminuye su velocidad hasta hacerse nulo en contacto con la superficie.	22
Figura 13: Evolución de la capa límite a lo largo de la superficie.	23
Figura 14: Desarrollo de la capa límite térmica a medida que el fluido recorre la superficie.	24
Figura 15: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y el entorno que lo rodea.	25
Figura 16: Distribución de la radiación en una superficie transparente.	26
Figura 17: Tipos de radiación que percibe una ventana expuesta en el exterior.	27
Figura 18: Comportamiento de la transmisividad de un vidrio estándar.	28
Figura 19: Mecanismos de transferencia de calor en la fachada de un edificio.	29
Figura 20: Representación del vidrio doble.	34
Figura 21: Asignación de las superficies que forman el vidrio doble.	35
Figura 22: Representación gráfica de la DFA con cristales simples y persianas en la cavidad, mostrando las diferentes temperaturas en cada región.	48
Figura 23: Representación gráfica de la temperatura entre las 6 y las 0:00 para el 17 de Julio en Barcelona.	51
Figura 24: Representación gráfica de la fachada de estudio. Elaborado con Solidworks 2014.	52

Lista de ecuaciones

(Ecuación 5.1).....	18	(Ecuación 5.30).....	36
(Ecuación 5.2).....	20	(Ecuación 5.31).....	36
(Ecuación 5.3).....	20	(Ecuación 5.32).....	36
(Ecuación 5.4).....	22	(Ecuación 5.33).....	36
(Ecuación 5.5).....	22	(Ecuación 5.34).....	37
(Ecuación 5.6).....	23	(Ecuación 5.35).....	38
(Ecuación 5.7).....	23	(Ecuación 5.36).....	38
(Ecuación 5.8).....	23	(Ecuación 5.37).....	38
(Ecuación 5.9).....	25	(Ecuación 5.38).....	39
(Ecuación 5.10).....	25	(Ecuación 5.39).....	39
(Ecuación 5.11).....	26	(Ecuación 5.40).....	39
(Ecuación 5.12).....	29	(Ecuación 5.41).....	39
(Ecuación 5.13).....	29	(Ecuación 5.42).....	39
(Ecuación 5.14).....	32	(Ecuación 5.43).....	39
(Ecuación 5.15).....	32	(Ecuación 5.44).....	40
(Ecuación 5.16).....	32	(Ecuación 5.45).....	40
(Ecuación 5.17).....	33	(Ecuación 5.46).....	47
(Ecuación 5.18).....	33	(Ecuación 5.47).....	48
(Ecuación 5.19).....	33	(Ecuación 5.48).....	48
(Ecuación 5.20).....	33	(Ecuación 5.49).....	48
(Ecuación 5.21).....	33	(Ecuación 0.1).....	75
(Ecuación 5.22).....	34	(Ecuación 0.2).....	76
(Ecuación 5.23).....	35	(Ecuación 0.3).....	77
(Ecuación 5.24).....	35	(Ecuación 0.4).....	77
(Ecuación 5.25).....	35	(Ecuación 0.5).....	77
(Ecuación 5.26).....	36	(Ecuación 0.6).....	77
(Ecuación 5.27).....	36	(Ecuación 0.7).....	77
(Ecuación 5.28).....	36	(Ecuación 0.8).....	78
(Ecuación 5.29).....	36	(Ecuación 0.9).....	78

Introducción

Actualmente el uso de las fachadas acristaladas de doble piel (DFA) está siendo muy estudiadas y aplicadas sobre todo en países desarrollados. Esta idea se está cada vez más intensificando y más con la (DIRECTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, 2012) en el que comenta que la Unión Europea se enfrente a retos como una creciente dependencia de las importaciones de energía y la escasez de los recursos humanos, además de limitar el cambio climático y superar la crisis económica. Entre los beneficios de una cada vez mejor eficiencia energética se consiguen los siguientes retos:

- Mejora el abastecimiento de la Unión.
- Reduce el consumo de la energía primaria y por lo tanto las importaciones de energía.
- Ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero de manera rentable en función con los costes, por lo que mitiga el cambio climático.
- El hecho de impulsar este cambio en los edificios nuevos y a la renovación de algunos edificios ya existentes provoca puestos de trabajo y así ayuda a disminuir la crisis.
- Debido a este abastecimiento en cuanto eficiencia energética da lugar al desarrollo y aparición de soluciones tecnológicas innovadoras y mejora la competitividad de la industria de la Unión, impulsando el crecimiento económico y creando empleos de alta calidad en varios sectores relacionados con la eficiencia energética.

Esta directiva tiene como objetivo primordial para el 2020 ahorrar un 20% en el consumo de energía de la Unión. Y según la directiva 2006/32/CE Energética 2011 destacaba que los edificios representan el 40% del consumo de energía final de la Unión. Además, tiene previsto para el 2020 conseguir zero-emission buildings, es decir, edificios cuyo impacto sobre el entorno sea nulo.

Actualmente en el entorno mediterráneo existen pocos edificios con esta tipología. Es por ello que en el siguiente estudio se centra en este tipo de fachada ubicadas en zonas cálidas. Los objetivos que se intentarán conseguir se resumen en los siguientes puntos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos generales

El objetivo general de este proyecto consiste en el aprovechamiento energético del Sol para reducir cargas de enfriamiento en el edificio. Para llevar a cabo esta idea se ha escogido una fachada de un edificio de oficinas de DFAV situada en Barcelona con orientación sur y se ha impuesto unos parámetros determinados tanto a nivel de propiedades de los elementos que lo componen como las condiciones climatológicas que ocurren en el exterior para hacer el caso lo más real posible. A partir de ese caso, se realizará un estudio paramétrico con el objetivo de obtener el caso óptimo de funcionamiento.

Los problemas que intenta cubrir en lo que se refiere al coste económico y al confort (sostenibilidad) son:

- Evitar sobrecalentamiento del edificio, pues la radiación del Sol penetra los cristales en mayor o menor medida y esto provoca el calentamiento del edificio, cosa que implica el gasto económico en cuanto a climatización para obtener un estado de confort para sus ocupantes.
- Aislamiento térmico del edificio. Evitar que el calor proporcionado en el interior se escape al exterior.
- Insonorización del edificio: esto ayuda al confort de los habitantes y evita que el ruido sea un problema para el edificio.
- Impacto al medio ambiente: dado que la fachada del edificio estará formado por cristales, es obligatorio que siga las restricciones que impone la normativa sobre los reflejos de los rayos de sol y evitar el deslumbramiento.
- Autoabastecimiento del edificio. Mediante la circulación de agua a través de las persianas se reducirá la energía térmica que recibe el edificio pues es absorbida por el fluido que podrá ser usado como Agua Caliente Sanitaria (ACS).

1.1.2. Objetivos específicos

Para conseguir los objetivos generales antes mencionados se intentará cubrir los siguientes objetivos específicos:

Sobrecalentamiento del edificio:

- Análisis de las propiedades ópticas de los cristales que forman la fachada del edificio.
- Análisis de la emisividad de los elementos que componen la fachada.
- Simulación del caso base escogido.
- Análisis de los mecanismos físicos de transmisión de calor que afectan a la DFAV.
- Desarrollo analítico a través de la teoría de transferencia de calor de un modelo más simplificado del caso simulado para la validación de los resultados obtenidos con el Fluent.

Aislamiento térmico del edificio:

- Análisis de las propiedades de los elementos que conforman la fachada; emisividad, conductividad térmica, el uso del aire entre los cristales, etc.

Impacto al medio ambiente:

- Se tiene en cuenta que la reflectividad de la envolvente del edificio no sea mayor a 0.6 – 0.7.

Aprovechamiento energético de la radiación Solar:

- Mediante agua en las persianas: estudio del calor absorbido y ver si el sentido de flujo mejora este hecho.

Para visualizar el potencial de la DFA haremos una comparación entre un edificio de fachada normal simple frente a una DFAV analizando los criterios antes mencionados y viendo el potencial que tiene esta última.

A partir de los resultados obtenidos veremos si se ha conseguido solventar estos problemas y expondremos futuras mejoras que se podrían realizar para optimizar la fachada acristalada. Así como las limitaciones que nos hemos encontrado a la hora de simular nuestro trabajo.

1.2. Alcance y limitaciones

1. Para el presente estudio sólo se han tenido en cuenta los efectos de la transmisividad del cristal interior sobre la recuperación de calor.
2. Se ha omitido el estudio de insonorización del edificio ya que una DFA aísla el edificio acústicamente.
3. El día que se ha escogido ha sido el 7 de Julio, pues es, supuestamente, el día en el que más calor hace.
4. Sólo se ha realizado la simulación de la fachada de una planta de dimensiones 4x6 m² de cara sur en una zona específica de Barcelona, con unas coordenadas dadas. En cuanto a la infiltración de aire al interior del edificio mediante este sistema, ocurre en los bordes de la ventana, en las sujeciones de los cristales. Pero no lo tendremos en cuenta en nuestro proyecto. Consideramos que la fachada tiene cristales con un sellado eficaz en sus bordes.
5. La radiación Solar está compuesta por directa, difusa y reflejada. Cuando introducimos estos parámetros en el Fluent contempla las dos primeras, pero no la última pues depende directamente de lo que haya en su alrededor, por lo tanto no la consideramos.
6. Consideramos que la temperatura fija interior debe ser de 22 °C, pero no tenemos en cuenta todas las cargas que se encuentran en el interior del edificio y que influyen en la temperatura del lugar interior. Así pues, en el balance de energía se debería tener en cuenta la transferencia de calor debida a las cargas internas del edificio:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{equipos} + \dot{Q}_{iluminación} + \dot{Q}_{ocupación}$$

Metodología utilizada

La metodología que se ha llevado a cabo en el presente trabajo es simulación numérica mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) con el programa Fluent 15.7. Para el estudio paramétrico de este trabajo se ha escogido un caso base con unas características determinadas y a partir de él se han simulado diversos casos variando un parámetro característico y se ha comparado con el caso base. Con los resultados obtenidos se ha elaborado tablas y gráficas y se ha obtenido el caso óptimo. Este caso óptimo se refiere a la mínima ganancia de calor del edificio y mínima pérdida de calor del interior hacía el exterior del edificio, y se verifica que si la temperatura del agua a la salida de las persianas es significativa.

Las simulaciones se han llevado a cabo para un lugar y una fecha determinada y en estado transitorio, abarcando resultado entre las 6:30 – 22:30, pues es cuando se aprecia el Sol.

Sostenibilidad en la Construcción

1.3. Introducción

Desde siempre el sector de la construcción, aparte de otros sectores industriales, que para su construcción o durante su vida útil es uno de los ámbitos que más consumen en recursos naturales, como la madera, minerales, agua, energía, etc. Y también responsable en la generación de grandes impactos industriales.

Según datos recogidos en un estudio sobre edificación, el sector de la construcción supone grandes consumos de recursos naturales y energías, además de su emisión de gases contaminantes a la atmosfera, tal y como puede observarse en la siguiente figura.

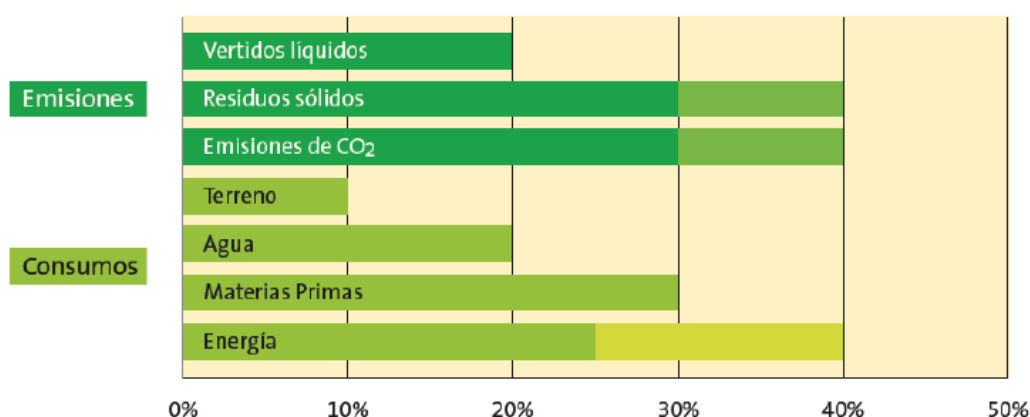


Figura 1: Emisiones de contaminantes y uso de recursos en el sector de la construcción (Isover & Gobain, 2010).

Debido a las repercusiones que supone el sector de la construcción en el medio ambiente, en los últimos años, la idea de sostenibilidad ha ido cobrando cada vez más importancia hasta tal punto que ha dado lugar a la aparición de nuevos organismos para establecer criterios y estrategias de sostenibilidad en la construcción. Dando lugar a la creación de diversas directivas u otras normativas de sostenibilidad y eficiencia energética.

La ultima directiva en vigor relativa a la eficiencia energética establecida por el Parlamento Europeo y el consejo de la Unión Europea es la Directiva 2012/27/UE donde se establece como objetivo primordial es conseguir para el 2020 una reducción del 20% de ahorro energético, y una reducción del 20% en las emisiones de CO₂. También pretende conseguir para el 2020 que los nuevos edificios sean de “emisión-zero”, es decir, que el consumo anual de energía de los mismos sean igual o menor que lo que pueden producir mediante fuentes de energía renovables desarrolladas en la misma edificación.

1.4. Concepto de Sostenibilidad y Construcción sostenible

Desde los años 90 la palabra sostenibilidad y desarrollo sostenible fueron apareciendo en diversos ámbitos de la vida humana ya sea de la naturaleza que sea (sociales, económicos, medioambientales, culturales, etc.).

Según Cáceres (Cáceres, 1996) estableció el concepto de sostenibilidad como la adaptación de los seres humanos con el entorno de manera que la naturaleza de los recursos no se degraden irreversiblemente.

En cuanto a la construcción sostenible existen diferentes definiciones. El más aceptado universalmente data en 1987 por parte de la Comisión de Brundtland (Brundtland World Commission on Environment and Development, 1987) que explica que el desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Otras definiciones datan en 1989 en la que (Pearce, Markandya, & Barbier) establecen que una sociedad sostenible no debe haber un declive no razonable de cualquier recurso o daño significativo de los sistemas naturales ni un declive significativo de la estabilidad social.

Otra propuesta es de (Daly, 1989), el mismo año, que establece que una sociedad sostenible es aquella en la que los recursos no se deben utilizar a un ritmo superior al de su ritmo de regeneración, no deben emitirse contaminantes a un ritmo superior al que el sistema natural es capaz de absorber o neutralizar, y que los recursos no renovables deben utilizarse a un ritmo más bajo que el que el capital humano creado pueda reemplazar al capital natural perdido.

A pesar de las tantas definiciones en lo que respecta al desarrollo sostenible, todas ellas tienen la misma idea, que consiste en:

- Sostener los recursos naturales
- Sostener los niveles de consumo
- Sostener niveles de producción
- Lograr la sostenibilidad de todos los recursos como capital humano, físico, recursos ambientales y recursos agotables.
- Ofrecer servicios ambientales, sociales y económicos a los miembros de una comunidad sin poner en peligro la viabilidad de los sistemas naturales, construidos y sociales de los que depende la oferta de esos servicios.

1.5. Política energética en Europa

Durante los años 90 se han llevado a cabo diversos actos importantes en lo que respecta al desarrollo sostenible en la construcción. En el año 1979 se aprueba en España la *Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas en los Edificios* que tienen como objetivo establecer las mejores prestaciones energéticas.

En 1988 se establece la (Directiva 89/108/CEE, 1988), que exige que las obras de construcción y las instalaciones de calefacción, refrigeración y ventilación sean diseñadas de tal forma que la cantidad de energía necesaria para su utilización sea reducida, respetando siempre el confort del interior del edificio.

En 2002 se aprueba la (Directiva 2002/91/CE, 2002) relativa a la eficiencia energética en los edificios que tiene como objetivo establecer los parámetros necesarios para cumplir el *Protocolo de Kioto*, cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. A partir de esta directiva se aprueba en España el Código Técnico de la Edificación (CTE) el 17 de marzo del 2006, el cual pretende acotar el consumo energético de algunas construcciones centrándose en la envolvente del edificio y el abastecimiento de agua caliente sanitaria (ACS). En su apartado HE de ahorro de energía establece los requerimientos necesarios de aislamiento térmico y de equipamientos de energía solar según las necesidades y ubicación geográfica del edificio. Las exigencias energéticas que se derivan de la aplicación de este código se calcula que puede suponer un ahorro de energía entre un 30 y un 40%, y una reducción de emisiones de CO₂ de 30-55%, según (Martínez Camarero, Baño Nieva, & Vigil-Escalera del Pozo, 2008)

En 2006 la Comisión Europea lanza el Plan de Acción Europeo de Eficiencia Energética cuyo objetivo es reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero, una mejora del 20% del rendimiento energético y un incremento del 20% de las energías renovables como fuente de energía en 2020.

Por último, el 14 de noviembre de 2012 el Parlamento Europeo y el Consejo aprobaron la reforma de la directiva 2010/91/CE en el que constata que la Unión Europea no va a alcanzar el objetivo de aumentar en un 20% la eficiencia energética en 2020. Pero aun así se exige que para el 2020 los nuevos edificios públicos o de oficinas que se construyan en la Unión Europea deban de ser “energía cero”. En otras palabras, el consumo anual en términos de energía del edificio sea igual o menor a la cantidad de energía que ésta pueda producir mediante fuentes de energía renovables obtenidas implementadas en la edificación.

Introducción a la DFA

El uso de vidrios en las fachadas sobretodo en oficinas se está realizando de forma más intensiva sobre todo en los países norteamericanos y las grandes ciudades europeas. El motivo de tal caso es debido, aparte de su atractivo arquitectónico permite dejar pasar luz visible al interior del edificio proporcionando una ventaja económica. Dicho fenómeno ha sido posible gracias a los avances tecnológicos en que los vidrios son cada vez mejores en sus propiedades ópticas para la reflexión del sol o su transmitancia.

1.6. Historia

Todo se remonta a los medianos del siglo XIX donde la envolvente exterior de los edificios o viviendas que se empleaban antiguamente eran hechas con muros de hormigón para soportar las cargas de toda la estructura. Fue a partir del 1800 donde se empezó a emplear el acero en la construcción de edificios, siendo el Second Leither Building de Chicago uno de los primeros con esta técnica de estructura ligera.



Figura 2: *Second Leith*, construido por Levi Leiter en 1891 (Chicago).

En 1931 se inauguró en Nueva York el Empire State Building de 85 plantas y 379 m de altura. De esta manera el uso del acero en la construcción se intensificó a partir de entonces y dio lugar al empleo del vidrio en las fachadas.

Más adelante se comenzó a desarrollar fachadas hechas de cristales para aprovechar la luz natural del sol manteniendo su atractivo arquitectónico. El primer edificio en cumplir este objetivo fue el Hallidie (San Francisco, 1918), de Willis Polk como el primer edificio de muro cortina que abrió camino a la modernidad de la arquitectura de cristales. Daba resultados deseados estéticamente pero como inconveniente se hallaba su bajo rendimiento térmico cosa que provocaba instalación de un sistema

de climatización interior de alto consumo energético para obtener un deseado confort interior. En aquella época los países occidentales y Japón podían permitirse tal lujo dada su elevada economía debido a su alta producción industrial y además de la energía barata que había entonces.



Figura 3: *Hallidie Building* (Sant Francisco). Es considerado el primer muro cortina de Estados Unidos.

Fue a partir del 1973 con la crisis del petróleo, que supuso una inflación del precio del barril frenando el ritmo de crecimiento de los países dependientes de él, cuando las potencias americanas tuvo que buscar alternativas para hacer frente a este problema, sobretodo en las industrias. Tuvieron que ahorrar energía, introducir innovaciones tecnológicas, reducir plantilla, etc. Fue entonces cuando los arquitectos de aquella época empezaron a investigar y diseñar edificios que pudieran mejorar el uso de la energía solar y la ventilación natural. Esto suponía un ahorro en los sistemas de acondicionamiento y la omisión de gran cantidad de iluminación interior durante los momentos de Sol. El objetivo primordial era mejorar el rendimiento térmico del edificio, mejorando el aislamiento del mismo pero sin perder la luz natural. Era importante que durante el invierno el edificio evite la pérdida de calor al exterior, y durante el verano evitar el sobrecalentamiento del edificio.

Esta idea se fue implementando en otros países desarrollados donde la preocupación por el medio ambiente fue ganando cada vez más peso. En los años 90 esta preocupación empieza a intervenir en el diseño arquitectónico de los nuevos edificios, tanto a nivel técnico como político, pues empiezan a difundir “edificios verdes” como una buena imagen para la arquitectura corporativa. De esta manera nacen las primeras normativas para promover el ahorro energético en el campo de la construcción tal y como se ha comentado en el capítulo anterior.

La idea de crear edificios de bajo consumo en climatización se ha ido desarrollando y mejorando con el paso de los años pasando de ser fachadas simples en los edificios de oficinas, hasta fachadas cada

vez más sofisticadas como es el caso de la doble piel acristalada ventilada mediante elementos motrices monitorizados de alto coste económico.

El primer edificio construido con doble fachada acristalada fue el *Occidental Chemical Center* (Figura 4). Consiste en una fachada doble acristalada con una ventilación motorizada donde el aire entre en la parte inferior del edificio y sale por la obertura superior.

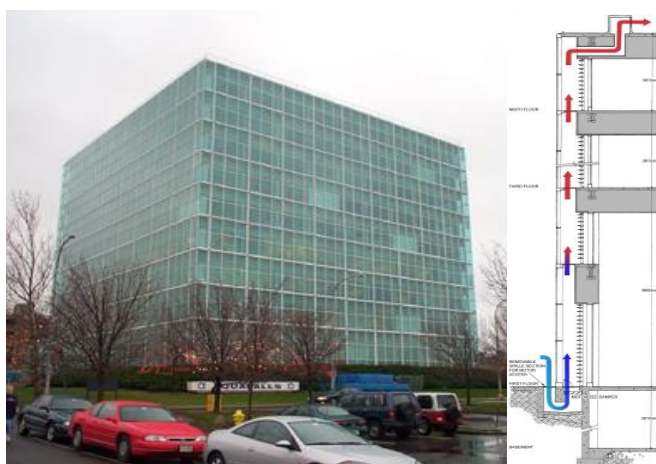


Figura 4: *Occidental Chemical Center* 1980 (Canadá). Es el primer edificio construido con doble fachada acristalada por los arquitectos Helmuth, Obata y Kassabaum. A la derecha se muestra la ventilación de la cavidad.

Más adelante se inauguró el primer edificio de fachada doble acristalada con ventilación natural, el *Business Promotion Centre* en Duisburg (Alemania), construido por Foster and Partners en 1993.

Luego en 1995 se inauguró el primer edificio con un sistema de ventilación mixto (Figura 5). Es decir, en la mayoría del tiempo anual funciona por ventilación natural, pero a veces hace uso de la ventilación mecánica.



Figura 5: *Galeries Lafayette* (Berlín), construido por Jean Nouvel en 1995.

1.7. Definición de la DFA

Existen varias definiciones respecto a este tipo de fachada, pero en general todas comparten la misma idea. La composición de la DFA está constituida por:

- Una piel exterior hecha de vidrio. Su misión principal es de proteger contra la intemperie, y protección de posibles impactos al edificio, aislamiento acústico y el aislamiento térmico del edificio optando por materiales de los cristales o una configuración determinada que actúen como barrera a la radiación solar, pero permitiendo el máximo de iluminación natural del Sol.
- Una cavidad entre pieles existente entre la piel exterior e interior. Su anchura puede variar de 20 cm a 2 m (Porcar, 2015), debido a diversas muestras realizadas. La ventilación de la cavidad puede ser natural (abierto a la atmósfera) o forzada (con el uso de ventiladores mecánicos o algún otro dispositivo de enfriamiento). Por último, en su interior se pueden emplear dispositivos de protección solar tales como persianas horizontales que se pueden operar de forma automática o manual dependiendo del momento del día. Esta idea es muy importante sobre todo en aquellas zonas donde las temperaturas suelen ser generalmente altas, como en el mediterráneo.
- Una piel interior, usualmente formada por dobles cristales, con el objetivo de minimizar el ruido que entra al edificio, aislar térmicamente el edificio debido a su doble cristal.

1.8. Aspectos técnicos de la DFA

Tal y como se ha clasificado en el apartado anterior, la fachada puede tener diferente actuación dependiendo de su tipología, modo de ventilación, profundidad de cavidad, etc. Ahora analizaremos otros parámetros que influyen mucho en esta característica, es decir, en su comportamiento termo-energético, como el tipo de vidrio empleado, presencia de cuerpos opacos en la fachada o las emisividad o propiedades ópticas de los cristales. Aparte de eso, cabe comentar que las condiciones climatológicas del lugar donde se emplea este tipo de fachada influyen también en su comportamiento termo-energético. Por último, también tenemos la orientación de la fachada. Todo ello, influye en el comportamiento global de la fachada. En conclusión, el diseño de una buena fachada doble acristalada es muy compleja, pues depende de diversos factores como lo antes expuesto.

En la siguiente lista se muestran los parámetros a tener en cuenta.

Aspectos de diseño de la DFAV:

- **Aspectos espaciales:**
 - **Profundidad de la cavidad:** Como se ha comentado anteriormente el espacio entre pieles varían entre 20 cm a los 2 m. A continuación veremos cómo afecta esto en el intercambio de calor en nuestra fachada.

Clase	Información
< 50 mm	Esto rara vez lo podemos ver en la práctica
50 – 200 mm	Para este caso la cavidad es ventilada mecánicamente. Es decir, por ventiladores u otros mecanismos.
200 – 500 mm	Este sería el ancho mínimo para evitar sobrecalentamiento.
500 – 2000 mm	Este tipo de fachada da la posibilidad de acceder a la cavidad.
>2000 mm	El espacio intermedio se transforma en un atrio.

Tabla 1: Clasificación de la fachada según la profundidad de la cavidad. También no indica la funcionabilidad para cada cavidad.

Por lo tanto podemos destacar que el hecho que se requiera de ventiladores en espacios muy pequeños es debido a que la velocidad del aire será mayor en la cavidad debida que es allí donde queda retenida los rayos infrarrojos del Sol (efecto invernadero).

- **Altura del compartimento.**
- **Propiedades del vidrio**
- **Propiedades térmicas**
- **Propiedades de los dispositivos de protección solar**
 - **Posición, dimensiones, separación**
 - **Emisividad, absorptividad y reflectancias del material.**

Para este caso evitar el sobrecalentamiento por rayos infrarrojos del Sol tenemos diversas opciones, entre las cuales, las más empleadas son:

- **Cortina de tejido.** se trata de cortinas plegables para diferentes momentos del día adecuándolo al momento del día. Cuanta más iluminación por parte del Sol, más cerrada debería estar. Su mantenimiento es sencillo, pues puede plegarse y retirarse para limpiarlo. Se hace cada 4-5 años.
- **Persianas venecianas.** Para nuestro estudio tendremos en cuenta este caso, pues es la más empleada en la mayoría de los casos.
- **Parasoles exteriores metálicos.** Pueden ser fijos o móviles.
- **Parasoles fotovoltaicos.** Con este sistema de sombreado se consiguen tres cosas: las células fotovoltaicas actúan como sombras en el interior del edificio. Emplean la tecnología de energía renovada Solar por lo que se obtiene agua electricidad además de proporcionar agua caliente sanitaria (ACS).
- **Parasoles cerámicos.** En algunos casos. La fachada están formados por cristal y las persianas puede ser cerámicos, como es el caso del Edificio New York Times (Figura 6).



Figura 6: Edificio de New York Times. Este edificio dispone de persianas formadas por tubos cerámicos que proporcionan sombra al edificio y actúan como colector solar.

- **Parasoles de vidrio.** En este caso las persianas están formados por elementos de vidrio. Por ejemplo la torre Agbar de Barcelona.



Figura 7: Torre Agbar. Formado por 34 plantas con un total de 145 metros de altura. Finalizado el 16 de septiembre de 2005 por el Grupo Agbar.

- **Circulación de aire en el interior de la cavidad**
 - o Posición de la abertura de entrada y salida de la entre piel.

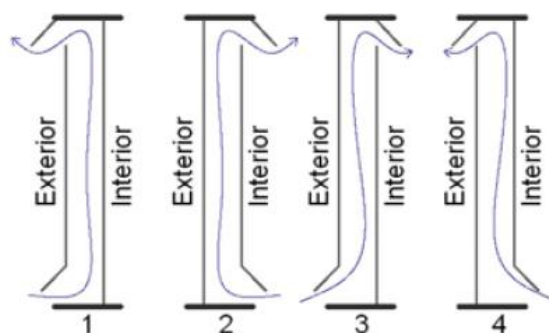


Figura 8: Dependiendo del clima exterior, las aperturas de ventilación de la cavidad tendrán una forma u otra.

- o Convección: natural o forzada

1.9. Ventajas e inconvenientes de la DFA

El uso de cristal, a pesar de ser indeseable desde un punto de vista de conservación de energía en las paredes exteriores, pues ofrecen en general y en comparación con los elementos opacos, poca resistencia al flujo de calor, son un componente esencial de cualquier fachada ya sea de un edificio como en una vivienda ya que mejoran la apariencia de estos, permiten que entren la luz del día (luz natural), proporciona calor solar en caso de día frío y mejora el confort de sus habitantes, pues pueden ver el exterior sin salir de sus casas.

A continuación vemos las ventajas e inconvenientes más concretos con el uso de ventanas en fachadas de edificios y/o casas.

1.9.1. Ventajas

- **Aislamiento acústico:** este tipo de configuración de doble cristal proporciona de por sí un aislamiento acústico en la envolvente del edificio con el exterior.
- **Aislamiento térmico:** Al disponer de aire en su interior la resistencia térmica de la envolvente aumenta.
- **Ahorro energético:** debido al aislamiento térmico del edificio, los costes de climatización en el interior se ve reducido drásticamente.
- **Buen mantenimiento de los elementos de sombras:** al estar en la mayoría de los casos en la entre-piel de la fachada no entran en contacto con agentes externos que podrían causar problemas, como la lluvia, nieve, etc. Por lo que su mantenimiento se hace más fácil.
- **Confort térmico:** hay un estudio que indica que el hecho que las personas pasen mayor tiempo a exposición de los rayos del sol de forma natural aumenta su bienestar durante el día.

1.9.2. Inconvenientes

- **Coste económico en la construcción elevado:** el hecho de poseer diversas capas y persianas o algún otro elemento de sombreado supone un alto coste frente a las fachadas convencionales. Antes de implantar una DFAV se debería analizar la recuperación de la inversión, y ver si es viable o no.
- **Reducción del espacio útil:** dado que la fachada abarca entre 50 – 2000 mm, esto produce una reducción del espacio utilizable del edificio.
- **Problema de sobrecalentamiento:** la clase se encuentra en la profundidad de la cavidad.
- **Aumento del peso de la estructura:** la estructura metálica que soporta esta fachada se verá afectada por los diferentes elementos que forman parte la fachada.
- **Cierta reducción de la luz solar debido a la doble piel:** cuantos más cristales formes la fachada, mayor será la pérdida de la luz solar.

Transmisión de calor en edificios

1.10. Introducción

Los cálculos que se han llevado a cabo en este proyecto tocan dos ramas de la ciencia: la transferencia de calor y la mecánica de fluidos. La primera surge debido a la existencia de gradientes de temperatura en nuestro edificio, mientras que la segunda se relaciona con la transferencia de calor debido al estado del fluido, en reposo o en movimiento.

Hay que comentar que la transferencia de calor, está estrechamente relacionada con la termodinámica, pues depende en gran medida de ésta y de sus leyes:

- **Primera ley de la termodinámica:** refleja el principio de conservación de la energía. Es decir, la energía no se puede ni crear ni destruir, sólo cambia de forma. Así pues, el balance de energía en un sistema se define como:

$$\dot{E}_{entra} - \dot{E}_{sale} = \Delta \dot{E}_{Sistema}$$

En el caso que se trate de un sistema en estado estacionario, el cambio de energía se mantiene constante:

$$\Delta E_{Sistema} = 0 \rightarrow \dot{E}_{entra} = \dot{E}_{sale}$$

- **Segunda ley de la termodinámica:** se define como la cantidad de entropía (o el grado de organización del sistema) que tiende a incrementarse con el tiempo. En este caso la temperatura, siempre irá de mayor temperatura a menor.

Por otro lado, hay que hacer una distinción entre los siguientes conceptos para evitar malentendidos:

- **Energía térmica:** se refiere al calor que posee un cuerpo. Se define con la temperatura.
- **Transferencia de calor:** es la transferencia de energía térmica de un cuerpo a otro.

Este último tiene que ver con el *flujo de calor* (\dot{q}) que se define como la razón de transferencia de calor por unidad de área.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (W/m^2) \quad \text{(Ecuación 0.1)}$$

Donde A es el área de la superficie donde tiene lugar la transferencia de calor.

1.11. Fundamentos de transferencia de calor

Según la segunda ley de la termodinámica, siempre que hay una diferencia de temperaturas existe una transmisión de calor que va desde un cuerpo caliente a un cuerpo frío (ley de la entropía). Este tránsito de energía se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación, tal y como puede verse en la figura 9 y en la tabla 2.

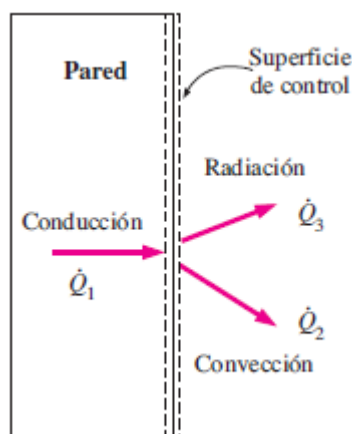


Figura 9: Mecanismos de transferencia de calor. En este caso, la pared adquiere calor por conducción y lo libera por radiación y convección.

Mecanismos de transferencia de calor		
Conducción	Convección	Radiación
Se basa en el contacto entre dos cuerpos ya sea sólido, líquido o gas que se encuentran a diferente temperatura.	Se basa en el movimiento de un fluido que es el que transporta el calor a diferentes zonas con las que tiene contacto.	Se basa en la energía en forma de ondas electromagnéticas que emiten los cuerpos debido a su temperatura.

Tabla 2: Explicación breve sobre los 3 mecanismos de transferencia de calor que existe en la naturaleza,

1.11.1. Conducción

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas (mayor vibración debido a su temperatura) de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas debido a la interacción entre estas partículas. Esto puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases. En el caso que se trate de gases o líquidos, es necesario que se encuentre en reposo, es decir, sin movimiento de fluido ya que si no daría lugar a la transferencia de calor por convección.

La rapidez o razón por la que se transfiere calor a través de un cuerpo depende de diversos factores, tales como: la configuración geométrica, el espesor, el material y la diferencia de temperaturas que hay entre sus extremos, en otras palabras, del gradiente de temperaturas.

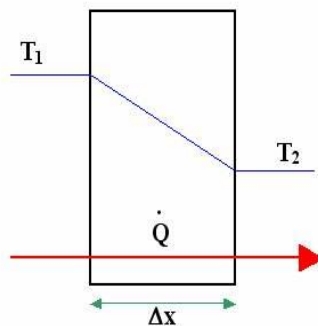


Figura 10: Transferencia de calor por conducción que va desde el lado más caliente al más frío.

La ley de Fourier, en honor a J. Fourier, permite calcular la cantidad de calor que se transfiere a través de un cuerpo debido al gradiente de temperaturas:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (\text{Ecuación 0.2})$$

Donde:

k: conductividad térmica del material.

A: es el área en contacto de la placa plana.

T: es la temperatura que hay en cada extremo del cuerpo.

Δx : espesor de la pared plana.

El flujo de calor de conducción por unidad de superficie se expresa como:

$$\dot{q}_{cond} = -k \frac{dT}{dx} \quad (W/m^2) \quad (\text{Ecuación 0.3})$$

El signo negativo indica que el gradiente de temperatura es decreciente, debido a la segunda ley de la termodinámica donde el calor se transfiere de la más caliente al más frío.

***Nota:** Hay régimen estacionario en transferencia de calor por conducción cuando la temperatura no varía con el tiempo, y transitorio cuando sí lo hace.

1.11.2. Convección

Consiste en la transferencia de energía entre una superficie sólida y un líquido o gas adyacente que está en movimiento. Entre más rápido sea este movimiento, mayor es la transferencia de calor entre la superficie y el fluido. En caso de que no exista movimiento de las partículas del fluido, entonces se estaría hablando de conducción pura. Una forma de ver cuánto se aleja de la conducción pura es mediante el número de Nusselt (Anexo), que relaciona conducción y convección.

La convección puede ser de tres tipos:

- **Convección forzada:** en el caso que el fluido es forzado a fluir sobre la superficie siguiendo una dirección por medios externos como un ventilador, una bomba o el viento.

No tiene que ser necesariamente un elemento externo el que actúe sobre el fluido. También puede ser dado por una gran variación de presión que provoca la circulación maciza del aire provocando fuertes vientos. No es nuestro caso, pues Barcelona se caracteriza por tener un clima tranquilo sin mucho viento.

- **Convección natural:** si el movimiento del fluido es causado por la variación de la densidad que hace que desplazarla hacia arriba debido a su temperatura.
- **Convección mixta:** tiene lugar cuando se combina estos dos tipos.

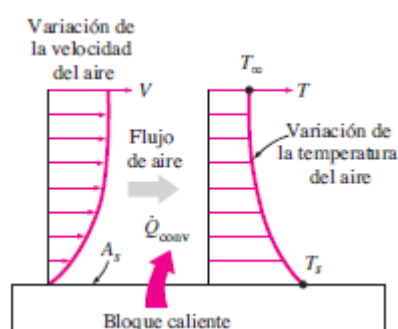


Figura 11: Transferencia de calor por convección.

***Nota:** La forma de determinar cómo es la convección de nuestro fluido en nuestro modelo de estudio es mediante el número de Grashof, que hablaremos más adelante en el Anexo, en cuanto a número adimensionales se refiere.

Para determinar el flujo de convección de calor es mediante la ley de Newton del enfriamiento que se define como:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (\text{Ecuación 0.4})$$

Donde

- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- T_s : temperatura de la superficie
- T_{∞} : es la temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie
- A : es el área en contacto del fluido y el sólido el cual tiene lugar la transferencia de calor.

***Nota:** Tal y como pasó en la conducción, una forma más práctica de hablar sobre flujo de calor es por unidad de superficie, así pues:

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_{\infty}) \quad (W/m^2) \quad (\text{Ecuación 0.5})$$

Este parámetro no es una propiedad del fluido, se calcula en forma experimental y depende de diversos factores, tales como:

- La geometría de la superficie
- Viscosidad dinámica
- Conductividad térmica
- Densidad
- Calor específico
- Velocidad del fluido
- Tipo de flujo, laminar o turbulento).

***Nota:** Los diseñadores utilizan valores establecidos para el cristal exterior y el cristal interior (ASHRAE, 1993). Esto lo veremos más detallado más adelante cuando hagamos el análisis matemático.

Un factor a tener en cuenta en la transferencia de calor por convección es la *condición de no deslizamiento* en el que se observa que la velocidad del fluido es nulo en contacto con la superficie de la placa y va aumentando a medida que se aleja de ésta tal y como se puede ver en la siguiente figura:

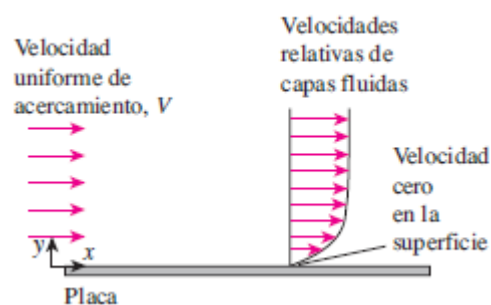


Figura 12: Condición de no deslizamiento. El fluido disminuye su velocidad hasta hacerse nulo en contacto con la superficie.

El espesor en el que la velocidad del fluido u es el 99% la velocidad del fluido en el infinito se conoce como **capa límite** (δ), tal como se puede observar en la siguiente figura:

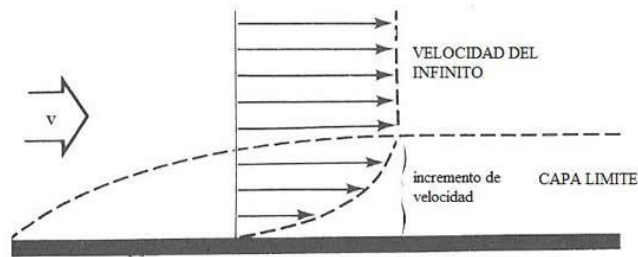


Figura 13: Evolución de la capa límite a lo largo de la superficie.

La propiedad responsable del perfil de velocidades y la capa límite es la *viscosidad*. Es decir, el fluido intentará arrastrar la placa por fricción mediante una fuerza cuyo valor por unidad de superficie se conoce como **esfuerzo cortante** (τ_w), que se define como:

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (\text{Ecuación 0.6})$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Los fluidos que obedecen esta relación lineal reciben el nombre de **fluidos Newtonianos**. Entre ellos encontramos el agua, el aire, la gasolina y los aceites. Por lo tanto, para nuestro proyecto consideraremos tanto el agua como el aire fluidos newtonianos y lo insertaremos al Fluent para la correcta simulación.

***Nota:** la determinación del esfuerzo cortante no es tan simple como parece, pues se requiere conocer el perfil de velocidades del fluido en la capa límite. Por lo tanto, es más común utilizar la siguiente expresión que relaciona este concepto con la velocidad del fluido superior.

$$\tau_w = C_f \frac{\rho V_\infty^2}{2} \quad (\text{Ecuación 0.7})$$

Donde C_f es el **coeficiente de fricción**, cuyo valor se determina en la mayoría de los casos de forma experimental, pero existe ciertas ecuaciones que nos puede ayudar a hallarla. Este es un parámetro muy importante para los estudios de transferencia de calor ya que su valor está relacionado directamente con el coeficiente de transferencia de calor. Así pues, podemos expresar C_f como:

$$C_f = \frac{f}{4} \quad (\text{Ecuación 0.8})$$

Donde f es el factor de fricción. Para el caso del fluido que circula por las persianas, la ecuación propuesta es la dada por (Colebrook–White equation, s.f.) que dice

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Creemos conveniente usar estas fórmulas ya que tiene en cuenta varios factores del fluido y de la superficie, como es el caso de ϵ , que se refiere a la rugosidad de la superficie. En nuestro caso, consideramos que el aluminio está pulido y es completamente liso y plano,

Capa límite térmico

Al igual que se desarrolla la capa límite de velocidades, lo mismo ocurre con la térmica, como se puede observar en la siguiente figura:

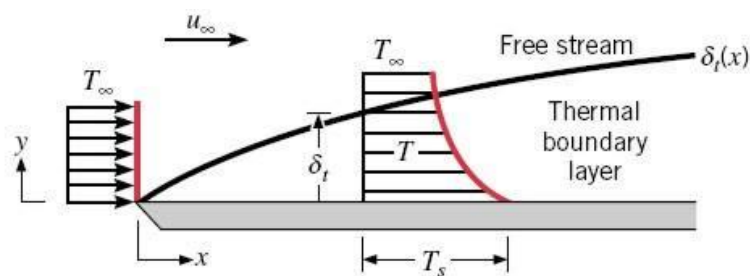


Figura 14: Desarrollo de la capa límite térmica a medida que el fluido recorre la superficie.

Donde el espesor de la capa límite térmica (δ_t) es aquella en que la temperatura del fluido es el 99% la temperatura del fluido en el infinito. La manera de expresar este espesor relacionando la capa límite de velocidad es mediante el número de Prandtl (Anexo). Para el caso de los gases es del orden de 1.

1.11.3. Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, ésta no requiere de un medio para propagarse y es la más rápida.

Existen diferentes tipos de radiaciones, de las cuales para este estudio se centrará en la radiación **térmica** (o infrarroja), que consiste en la radiación emitida por un cuerpo debido a su temperatura.

La ley de Stefan-Boltzmann nos permite calcular la cantidad de calor que transmite un cuerpo en función de su temperatura:

$$\dot{Q}_{\text{radiación emitida}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (\text{Ecuación 0.9})$$

Donde

ε : emisividad de la superficie. Depende del material y del acabado superficial.

σ : constante de Boltzmann igual a $5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}^4$

A_s : área superficial a analizar en m^2

T_s : Temperatura superficial en K

El flujo de calor de radiación por unidad de superficie se expresa como:

$$\dot{q}_{\text{radiación emitida}} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (\text{Ecuación 0.10})$$

En el caso que una superficie esté rodeada por completo por otra superficie mucho más grande a una temperatura determinada, y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, el flujo de calor queda determinado de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4)$$

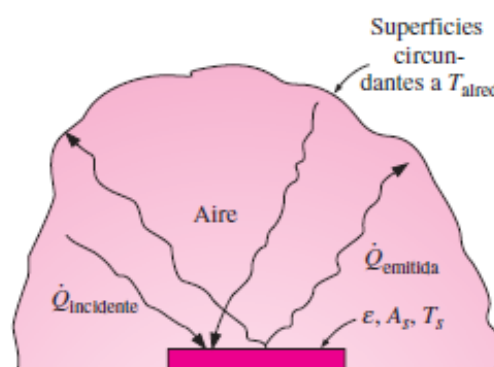


Figura 15: Transferencia de calor por radiación entre una superficie y el entorno que lo rodea.

En este caso la radiación entre estas dos superficies ocurre paralelamente con la convección (o conducción cuando el gas está inmóvil). Por este motivo, se habla de *coeficiente combinado de transferencia de calor* que relaciona estos dos tipos de transferencia de calor. Esto se puede ver en la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = h_{conv}A_s(T_s - T_{alred}) + \varepsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_{alred}^4) = h_{combinado}A_s(T_s - T_{alred})$$

Donde

$$h_{combinado} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \varepsilon\sigma(T_s + T_{alred})(T_s^2 + T_{alred}^2)$$

***Nota:** la radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero despreciable para la convección forzada.

Otra propiedad importante relacionada con la radiación es la **absorsividad**, que se define como la fracción de la energía de radiación incidente que es absorbida por la superficie. Para entender mejor este concepto tenemos que hablar de la irradiación (I), que es la energía de radiación incidente en una superficie. Cuando ésta choca contra una superficie puede ser absorbida, reflejada o transmitida:

$$I = \alpha I + \pi I + \tau I \quad (\text{Ecuación 0.11})$$

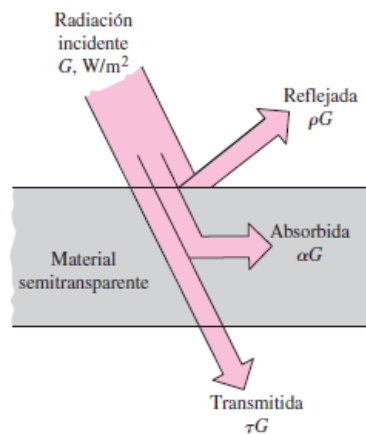


Figura 16: Distribución de la radiación en una superficie transparente.

Donde

α : fracción de radiación incidente absorbente o absorbancia.

π : fracción de radiación incidente reflejado o reflexión.

τ : fracción de radiación incidente transmitido o transmitancia.

Si se trata de una superficie transparente la irradiación se absorbe, se refleja y se transmite a través de ella. Por lo tanto se produce los tres fenómenos antes expuestos. En el caso que la superficie sea opaca, la irradiación no se transmitirá. Simplemente se reflejará parte de ella mientras que el resto de la energía se absorberá en el material en forma de calor.

1.12. Transferencia de calor a través de nuestra fachada de estudio (Análisis matemático)

El calor que ingresa en el interior de una fachada acristalada es debido a dos causas: una sería debido a la radiación solar, y la otra debido a la diferencia de temperatura entre el ambiente exterior y el ambiente interior del local.

No cabe duda que el calor que ingresa en el interior es consecuencia directa de la radiación solar. Cuando el Sol proyecta luz a la Tierra, sus ondas electromagnéticas se dividen en:

- 9% radiación ultravioleta (con longitudes de ondas de 0.29 – 0.4).
- 39% radiación visible (con longitudes de ondas de 0.4 – 0.7).
- 52% radiación infrarroja (con longitudes de ondas de 0.7 – 3.5).

Por otro lado, la radiación solar que percibe un cristal expuesta al exterior se divide en 3 partes:

- **Radiación directa:** cuando ésta no es dispersada ni absorbida por las moléculas de aire y vapor de agua, polvo o gotitas de agua que se encuentran en la nube. Podemos decir que esta radiación llega de forma recta y choca contra el cristal.
- **Radiación difusa:** cuando ésta es absorbida y dispersada. En este caso esta radiación viene de todas las direcciones del cielo.
- **Radiación reflejada:** esta hace referencia a la radiación de aquellas superficies expuestas al sol y que son reflejadas a la ventana.

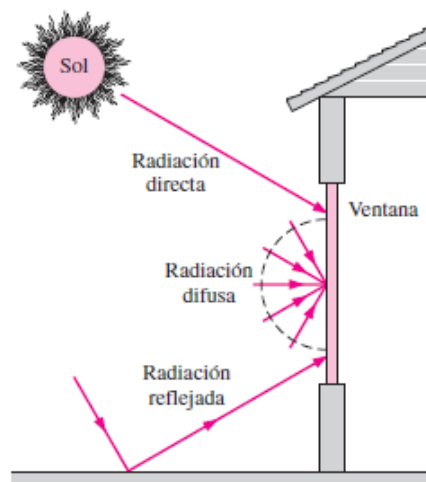


Figura 17: Tipos de radiación que percibe una ventana expuesta en el exterior.

Según estudios realizados (ASHRAE, 1993) se demuestra que las propiedades ópticas de los cristales se mantienen constantes cuando la radiación solar incide hasta un ángulo de 60º aproximadamente con respecto a la normal de la superficie del cristal.

Considerando la radiación Solar incidente como la global que choca contra la superficie de un vidrio, ésta se divide en tres partes tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

Para el caso de un cristal estándar se tiene los siguientes valores:

Propiedades del cristal estándar	
ρ	7
α	15
τ	78

Tabla 3: Propiedades ópticas para u cristal estándar de espesor 6 mm.

La transmisividad de un vidrio estándar se puede ver en la siguiente figura donde se puede observar que éste deja pasar luz visible e infrarroja pero bloquea gran parte de la radiación ultravioleta.

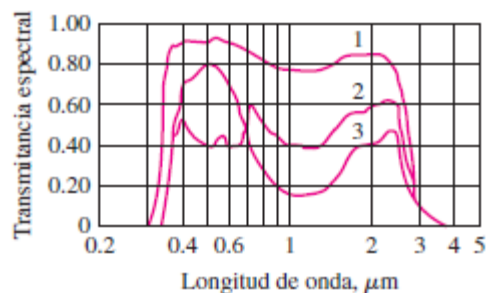


Figura 18: Comportamiento de la transmisividad de un vidrio estándar.

De esta manera el calor por parte de la radiación Solar entra en el interior del edificio. Este fenómeno se conoce como *ganancia solar*. Por otro lado al existir una diferencia de temperatura entre el exterior del local y el interior entran en juego los mecanismos de transmisión de calor:

- **Parte radiante:** los elementos exteriores (como los cristales, las paredes, los marcos, etc.) al haber sido expuesto a la radiación solar, han absorbido parte de ésta y por lo tanto poseen una cierta temperatura que provoca que desprendan calor por radiación.
- **Parte convectiva:** la transmisión de calor es debida a la existencia de un gradiente de temperatura entre la superficie de los elementos de la fachada y el ambiente que les rodea.
- **Parte conductiva:** debido a la diferencia de temperatura entre la superficie interior y exterior de los elementos que conforman las fachadas (como los cristales, paredes, etc.). Esto se produce también en el gas que queda atrapado entre los cristales de doble piel. La condición para que esto ocurra es que el aire permanezca inmóvil.

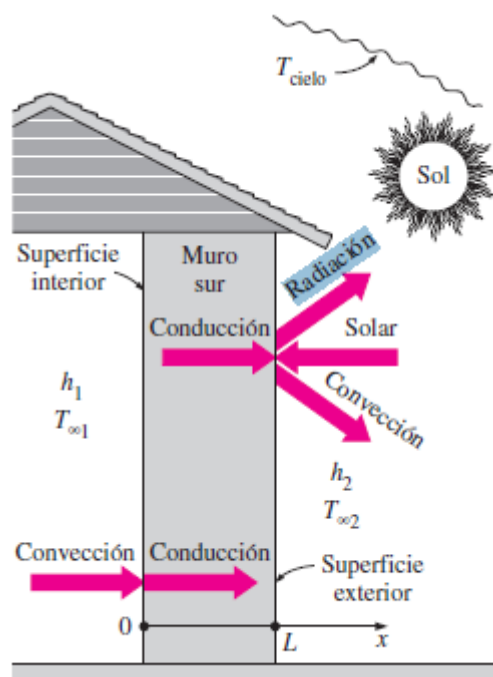


Figura 19: Mecanismos de transferencia de calor en la fachada de un edificio.

En conclusión, dos conceptos a tener en cuenta en lo que a transferencia de calor en el interior de la fachada se refiere son:

- **Factor U (U):** coeficiente de transferencia de calor total que ingresa en el interior del edificio. También se puede expresar en términos de resistencia térmica:

$$R = \frac{1}{U} \quad (\text{Ecuación 0.12})$$

Donde R es la resistencia térmica total de la fachada.

- **Factor solar o Ganancia solar:** definido como:

$$SHGC = \frac{\text{Ganancia de calor solar a través de la ventana}}{\text{Radiación solar que incide sobre la ventana}} = \frac{\dot{q}_{\text{ganancia solar}}}{\dot{q}_{\text{incidente solar}}} \quad (\text{Ecuación 0.13})$$

$$SHGC = \tau_s + f\alpha_s$$

Donde τ_s es la transmisividad de la superficie del cristal, α_s es la absorptividad del material del vidrio y f es fracción de radiación solar que atraviesa este cristal.

La unión $f\alpha_s$ se refiere a la radiación que es absorbida por el vidrio y vuelta a emitir al interior. En la siguiente tabla se dan valores para cristales de uso común en el ventanaje (ASHRAE, 1993):

	Tipo de en cristallado	Espesor nominal (mm)	τ_{solar}	SHGC
En cristallado sencillo	Transparente	3	0.86	0.87
		6	0.78	0.83
		10	0.72	0.80
		13	0.67	0.77
	Absorbente de calor	3	0.64	0.74
		6	0.46	0.64
		10	0.33	0.56
		13	0.24	0.50
En cristallado doble	Transparente ambos cristales	3	0.71	0.77
		6	0.61	0.71
	Transparente dentro, absorbente del calor afuera	6	0.36	0.50

Tabla 4: Coeficiente de ganancia solar y transmisividad para diferentes tipos de ventanas.

Para determinar el calor que ingresa en el interior del edificio de forma analítica se estudia 4 tipos de fachadas:

- Fachada de vidrio simple
- Fachada de vidrio doble
- Doble fachada de vidrios simples
- Doble fachada de cristal exterior simple y vidrio doble interior

Antes de realizar estos cálculos se hacen las siguientes suposiciones:

- Se considera la transferencia de calor en estado estacionario y unidimensional.
- Los coeficientes de transferencia de calor de los vidrios y del ambiente exterior e interior son coeficientes de transferencia de calor combinados, es decir, contempla los efectos de radiación y convección.
- La temperatura superficial exterior e interior del vidrio se considera iguales (Anexo)
- Los índices indican lo siguiente:
 - Para calor transferido:
 - 1: Calor entrante al interior del local
 - 2: Calor que sale al ambiente exterior.
 - Para absorbancias
 - o: Absorbancia del cristal exterior de la configuración.
 - i: Absorbancia del cristal interior de la configuración.
 - Las absorbancias con numeraciones se refieren a la superficie del cristal que corresponde. Siguiendo siempre la regla de 1 para la superficie del cristal exterior y 2 la que da al interior.

A continuación se muestran tablas que hacen referencias a valores estándar (ASHRAE, 1993) obtenidos para realizar las simulaciones de cada caso.

Condiciones de diseño			
Propiedades	Unidades	Verano	Invierno
T_i	°C	24	21
T_o		30	-18
T_{vi}		32	-7
h_i	$\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	8.29	
h_o		22.7	34.0

Tabla 5: Temperaturas interior y exterior en condiciones de diseño para verano e invierno.

Coeficientes de transferencia de calor en condiciones de diseño para verano ($W/m^2 K$)		
h_o	Coeficientes de transferencia de calor entre el ambiente exterior y la cara exterior del vidrio exterior.	22.7
h_i	Coeficiente de transferencia de calor entre el ambiente interior y la cara interior del cristal interior.	8.29
h_s	Coeficiente de transferencia de calor en la cavidad entre cristales	9
h_v	Coeficiente de transferencia de calor en el espacio que hay entre vidrio para el caso del vidrio doble.	7.5

Tabla 6: Coeficientes combinados para varias zonas de la fachada y cristales.

1.12.1. Fachada de vidrio simple

Consideramos un vidrio común formado por un solo cristal de espesor e y una conductividad térmica k en un día de verano con los siguientes coeficientes combinados de transferencia de calor para la superficie interior y exterior, respectivamente:

Propiedades del cristal	
e (mm)	6
k (W/m · °C)	0.92
α	0.15
ρ	0.07
τ	0.78
h_i (W/m ² · °C)	8.29
h_o (W/m ² · °C)	34.0

Tabla 7: Propiedades físicas y ópticas de un cristal estándar.

Balance de energía

$$I\alpha = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 \quad (\text{Ecuación 0.14})$$

*Nota: Considerando las temperaturas superficiales de la cara interior y exterior iguales

$$T_{ve} = T_{vi} = T$$

Donde:

$$\dot{Q}_1 = h_o(T_v - T_o) \cdot S$$

$$\dot{Q}_2 = h_i(T_v - T_i) \cdot S$$

El calor entrante en el interior de la fachada corresponde al calor entrante en el interior, es decir \dot{Q}_1 .

Entonces, partiendo del balance energético y despejando T_v

$$T_v = \frac{I\alpha + h_o T_o + h_i T_i}{h_o + h_i} \quad (\text{Ecuación 0.15})$$

Podemos determinar \dot{Q}_1 , como:

$$\dot{Q}_1 = I\alpha \frac{h_i}{h_i + h_o} \cdot S + U(T_o + T_i) \cdot S \quad (\text{Ecuación 0.16})$$

Siendo el Factor U:

$$U = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 0.17})$$

***Observación:** La transferencia de calor al interior del local se compone de dos mecanismos:

➤ **Parte radiativa:**

$$Q_{r1} = I \alpha \frac{h_i}{h_i + h_o} \cdot S \quad (\text{Ecuación 0.18})$$

➤ **Parte convectiva:**

$$Q_{c1} = U(T_o + T_i) \cdot S \quad (\text{Ecuación 0.19})$$

Siendo por lo tanto el factor solar:

$$SHGC = \tau + \alpha \frac{h_i}{h_o + h_i} \quad (\text{Ecuación 0.20})$$

Así pues, el calor total que ingresa dentro del edificio queda:

$$q_{total} = q_R + q_C = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (W/m^2) \quad (\text{Ecuación 0.21})$$

Donde

$$q_R = SHGC \cdot I$$

$$q_C = U(T_o - T_i)$$

1.12.2. Fachada de vidrio doble

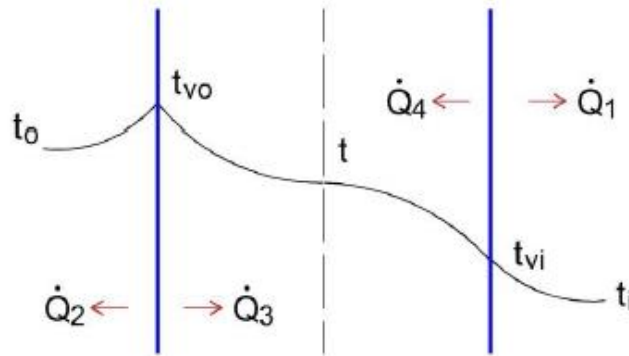


Figura 20: Representación del vidrio doble.

Para este caso consideramos un vidrio de doble piel formado por cristales simples de espesor e y una cavidad de longitud L .

Resumen Vidrio Doble	
e (mm)	3
L (mm)	6
$\varepsilon_{\text{efectiva}}$	0.72
T_o (°C)	32
T_i (°C)	24
h_s (W/m ² · °C)	7.05
h_i (W/m ² · °C)	8.29
h_o (W/m ² · °C)	34.0

Tabla 8: Condiciones de trabajo para el vidrio doble.

Donde $\varepsilon_{\text{efectiva}}$ es la emisividad equivalente entre dos placas paralelas de emisividades ε_1 y ε_2 , cuyo valor se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{\text{efectiva}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{Ecuación 0.22})$$

***Nota:** Para el caso de un vidrio doble donde la emisividad de cada cristal es 0.84, la emisividad equivalente correspondiente es 0.72.

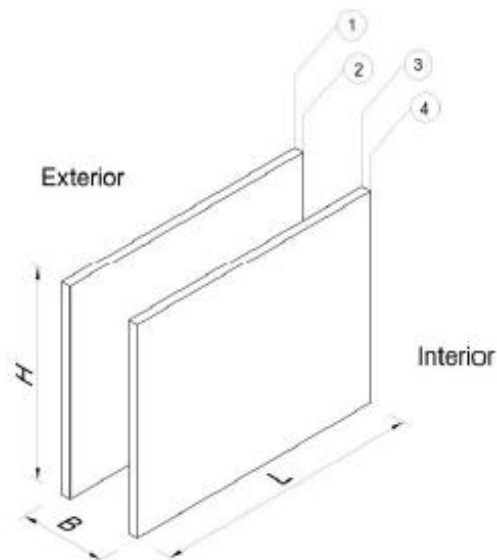


Figura 21: Asignación de las superficies que forman el vidrio doble.

Antes de realizar cualquier tipo de cálculo es necesario definir previamente detalles a tener en cuenta. En la Figura 21 se muestran las superficies con las que trabajaremos para hacer los cálculos numéricos.

- **Superficie 1:** cara exterior del cristal exterior.
- **Superficie 2:** cara interior del cristal exterior.
- **Superficie 3:** cara exterior del cristal interior.
- **Superficie 4:** cara interior del cristal interior.

En cuando a las propiedades ópticas (Modest, 2003) se define

- **Transmisividad global:** las caras 1 y 3 permiten el paso de la luz solar mientras que las caras 2 y 3 rebotan la radiación no transmitida.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_o \tau_i}{1 - \rho_2 \rho_3} \quad (\text{Ecuación 0.23})$$

- **Absorbancias globales:** la absorbancia en el vidrio exterior e interior es consecuencia de la absorbancia en las caras 1, 2 y 3 y de las reflectancias de las caras 2 y 3. (Contreras, 2013)

$$\alpha_o = \alpha_1 + \alpha_2 \frac{\tau_o \rho_3}{1 - \rho_2 \rho_3} \quad (\text{Ecuación 0.24})$$

$$\alpha_i = \alpha_3 \frac{\tau_o}{1 - \rho_2 \rho_3} \quad (\text{Ecuación 0.25})$$

Balance energético del vidrio doble

En condiciones de estabilidad térmica, el balance energético para la superficie exterior e interior queda de la siguiente manera:

Balance energético superficie exterior:

$$I\alpha_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

Donde

$$\dot{Q}_2 = h_o(T_{vo} - T_o) \cdot S$$

$$\dot{Q}_3 = h_v(T_{vo} - T_v) \cdot S$$

Balance energético superficie interior:

$$I\alpha_2 = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_4$$

Donde

$$\dot{Q}_1 = h_i(T_{vi} - T_i) \cdot S$$

$$\dot{Q}_4 = h_v(T_{vi} - T_v) \cdot S$$

Donde las temperaturas del vidrio interior e exterior se determinan mediante las fórmulas:

$$T_{vo} = A + \frac{h_v}{h_o + h_v} \cdot T_v \quad (\text{Ecuación 0.26})$$

$$T_{vi} = B + \frac{h_v}{h_i + h_v} \cdot T_v \quad (\text{Ecuación 0.27})$$

$$T_{\text{espacio}} = \frac{A + B}{2 - C} \quad (\text{Ecuación 0.28})$$

Cuyos parámetros son:

$$A = \frac{I\alpha_o + h_o T_o}{h_o + h_v} \quad (\text{Ecuación 0.29})$$

$$B = \frac{I\alpha_i + h_i T_i}{h_i + h_v} \quad (\text{Ecuación 0.30})$$

$$C = \frac{h_v}{h_o + h_v} + \frac{h_v}{h_i + h_v} \quad (\text{Ecuación 0.31})$$

Para este tipo de en cristallado el calor entrante queda definido como:

$$\dot{Q}_1 = I\alpha_i \frac{U_i}{h_s} \cdot S + U_i(T_v - T_i) \cdot S \quad (\text{Ecuación 0.32})$$

Donde

$$h_s = 2 h_v, \text{ (ASHRAE, 1993)}$$

$$U_i = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_s} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 0.33})$$

Por lo tanto, como en el caso del vidrio simple, éste también contiene dos partes bien diferenciadas

Parte de la radiación:

$$Q_{r1} = I \alpha_i \frac{h_i}{h_o + h_i} \cdot S$$

Parte de la convección

$$Q_{c1} = U_i(T_v - T_i) \cdot S$$

Donde el factor solar se define como la parte de la radiación solar que se transmite a través de los espejos más la parte radiante del cristal que ha absorbido la radiación del Sol.

$$SHGC = \bar{\tau} + \alpha_i \frac{h_i}{h_o + h_i} \quad (\text{Ecuación 0.34})$$

Así pues, el calor total que ingresa dentro del edificio queda:

$$q_{total} = q_R + q_C$$

Donde

$$q_R = SHGC \cdot I$$

$$q_C = U(T_o - T_i)$$

1.12.3. Doble fachada de cristales simples

Este caso es muy parecido al anterior (1.12.2) pero con un matiz. La distancia L de la cavidad es mucho más grande y por lo tanto la transferencia de calor en su interior es puramente convectiva, en otras palabras, el número de Nusselt es mucho mayor cuando mayor sea la distancia de esta cavidad.

La cantidad de calor que ingresa en el interior del local queda determinado por la siguiente fórmula:

$$\frac{\dot{Q}_1}{S} = I \alpha_o \frac{U}{h_o} + I \alpha_i U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h'_s} \right) + U (T_o - T_i) \quad (\text{Ecuación 0.35})$$

Donde

$h_{s'} = \frac{h_s}{2}$, según ASHRAE (1993) “*Handbook Fundamentals*”.

$$U = \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h'_s} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 0.36})$$

Por lo tanto, como en el caso del vidrio simple, éste también contiene dos partes bien diferenciadas:

Parte de la radiación:

$$\frac{Q_{r1}}{S} = I \alpha_o \frac{U}{h_o} + I \alpha_i U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h'_s} \right)$$

Parte de la convección

$$\frac{Q_{c1}}{S} = U (T_{cavidad} - T_i)$$

Donde el Factor solar se define como la parte de la radiación solar que se transmite a través de los espejos más la parte radiante del cristal que ha absorbido la radiación del Sol.

$$SHGC = \bar{\tau} + \alpha_o \frac{U}{h_o} + \alpha_i U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h'_s} \right) \quad (\text{Ecuación 0.37})$$

Así pues, el calor total que ingresa dentro del edificio queda:

$$q_{total} = q_R + q_C$$

Donde

$$q_R = SHGC \cdot I$$

$$q_C = U (T_o - T_i)$$

1.12.4. Doble fachada con cristal exterior simple y doble interior

Este caso no deja de ser diferente a los otros dos anteriores. La diferencia está en que el cristal interior es doble. Por lo tanto, antes de realizar cualquier cálculo de transferencia de calor, es conveniente sustituir el cristal doble interior por uno simple equivalente y entonces tendremos exactamente lo mismo que en el caso anterior. Los parámetros a determinar son:

- La transmitancia del vidrio doble: esto se puede determinar con la ecuación de transmitancia total entre dos cristales (Ecuación 0.23)
- La absorbancia equivalente: en este caso queda definido de la siguiente manera. Siendo α_i la suma de las absorbancias del vidrio doble interior (Contreras, 2013)

$$\alpha = \alpha_o + \alpha_i \quad (\text{Ecuación 0.38})$$

- Coeficientes de calor por convección para ambos lados
 - h'_s corresponde al coeficiente de convección del espacio entre vidrios.

$$h'_s = \left(\frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_v} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 0.39})$$

- h'_i corresponde al lado interior del local.

$$h'_i = \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_v} \right)^{-1} \quad (\text{Ecuación 0.40})$$

Así pues, el vidrio simple equivalente tendrá una transmitancia igual a $\bar{\tau}$, una absorbancia α , y unos coeficientes de transferencia de calor a cada lado de h'_s y h'_i .

Balance energético en la cara exterior

$$I \alpha_o = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$

Donde

$$\dot{Q}_2 = h_o(T_{vo} - T_o)$$

$$\dot{Q}_3 = h_s(T_{vo} - T_s)$$

Balance energético en la cara interior

$$I \alpha_i = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_4$$

Donde

$$\dot{Q}_1 = h'_i(T_{vi} - T_i)$$

$$\dot{Q}_4 = h'_s(T_{vo} - T_s)$$

Donde las temperaturas del vidrio interior e exterior se determinan mediante las fórmulas:

$$T_{vo} = A + \frac{h_s}{h_o + h_s} \cdot T_s \quad (\text{Ecuación 0.41})$$

$$T_{vi} = B' + \frac{h'_s}{h'_i + h'_s} \cdot T_s \quad (\text{Ecuación 0.42})$$

$$T_s = \frac{A_1 + B_1}{h_s + h'_s - C_1} \quad (\text{Ecuación 0.43})$$

Cuyos parámetros son:

$$A = \frac{I \alpha_o + h_o T_o}{h_o + h_s}$$

$$A_1 = h_s \cdot A$$

$$B' = \frac{I \alpha + h'_i T_i}{h'_i + h_s}$$

$$B_1 = h'_s \cdot B'$$

$$C_1 = \frac{h_s^2}{h_o + h_s} + \frac{h'^2_s}{h'_i + h'_s}$$

Para este tipo de encristalado el calor entrante queda definido como:

$$\dot{Q} = I \alpha_o \frac{U}{h_o} \cdot S + I \alpha_i U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h'_s} \right) + U(T_o - T_i) \cdot S \quad (\text{Ecuación 0.44})$$

Donde

$$U = \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h'_s} + \frac{1}{h'_i} \right)^{-1}$$

Por lo tanto, como en los casos anteriores, éste también contiene dos partes bien diferenciadas:

➤ **Parte de la radiación:**

$$\frac{Q_{r1}}{S} = I \alpha_o \frac{U}{h_o} + I \alpha U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h'_s} \right)$$

➤ **Parte de la convección**

$$\frac{Q_{c1}}{S} = U(T_o - T_i)$$

Donde el factor solar se define como la parte de la radiación solar que se transmite a través de los espejos más la parte radiante del cristal que ha absorbido la radiación del Sol.

$$SHGC = \bar{\tau} + \alpha_o \frac{U}{h_o} + \alpha U \left(\frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h'_s} \right) \quad (\text{Ecuación 0.45})$$

Así pues, el calor total que ingresa dentro del edificio queda:

$$q_{total} = q_R + q_C$$

Donde

$$q_R = SHGC \cdot I$$

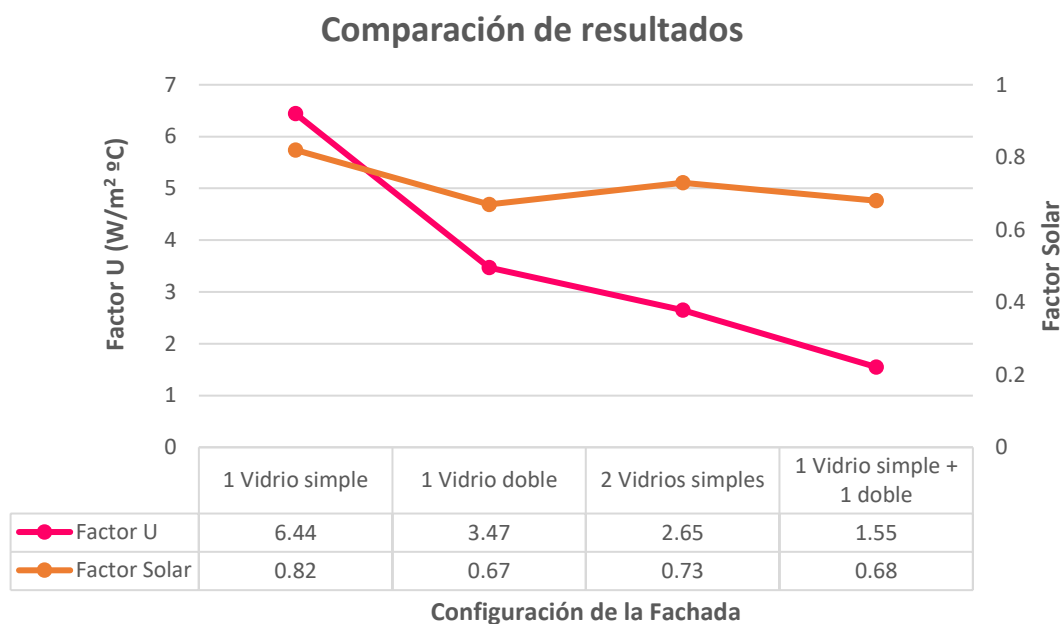
$$q_C = U(T_o - T_i)$$

1.12.5. Comparación de los 4 casos

Para ver el comportamiento de una forma más visual se ha representado sus valores en la siguiente tabla:

	Fachada Vidrio simple	Fachada Vidrio doble	Doble Fachada 2 vidrios simples	Doble Fachada 1 vidrio simple + 1 doble
Factor U $U \left(\frac{W}{m^2} ^\circ C \right)$	6.44	3.47	2.65	1.55
Factor Solar $SHGC$	0.82	0.67	0.73	0.68
Calor convectivo $\dot{q}_{1C} \left(\frac{W}{m^2} \right)$	32.22	17.35	13.25	7.75
Calor radiativo $\dot{q}_{1R} \left(\frac{W}{m^2} \right)$	571.20	455.60	496.40	462.40
Calor total $\dot{q}_{total} \left(\frac{W}{m^2} \right)$	603.40	472.95	509.65	470.15

Tabla 9: Comparación de los diferentes tipos de fachadas según el calor que entra en el interior del edificio. Contempla calor por el factor U y por ganancia Solar.



Gráfica 1: Comparación del factor U y la ganancia solar para diferentes configuraciones de la fachada.

Observaciones:

Tal y como se puede observar, para el caso de un vidrio simple, posee altos valores de factor U y solar. En un principio se ve claramente que esto no beneficia en absoluto a una ventana, pues primero: deja pasar mucha radiación solar, y segundo posee alto valor U, lo que indica que su resistencia a dejar pasar calor es más bien baja. Eso no es conveniente para un edificio de oficinas, pues supone altos costes de refrigeración, debido a este factor U, que indica que el calor atraviesa con facilidad la fachada. Aparte, la reducción acústico para este tipo de en cristallado es bajo, pues sólo dispone de una sola lámina de vidrio que lo separa del ambiente exterior.

Para el caso de un cristal doble, obtenemos cierta mejora. En este caso el coeficiente de transferencia de calor se ha reducido un 46% respecto al simple. En otras palabras, nuestro local está mejor aislado térmicamente. Esto es debido a que un cristal doble posee aire inmóvil en su interior ya que éste es un gran aislante térmico y barato. En cuanto a la ganancia solar, también ha bajado considerablemente, cosa que es buena señal.

Para el caso de una doble fachada de cristales simples, el factor U mejora un 24%. Sin embargo, el factor de ganancia solar permanece prácticamente igual.

Por último, para el caso de una doble fachada con un vidrio doble interior, vemos que el aislamiento térmico se reduce hasta un 41% respecto a la anterior. Por lo tanto, según esta gráfica todo indica que

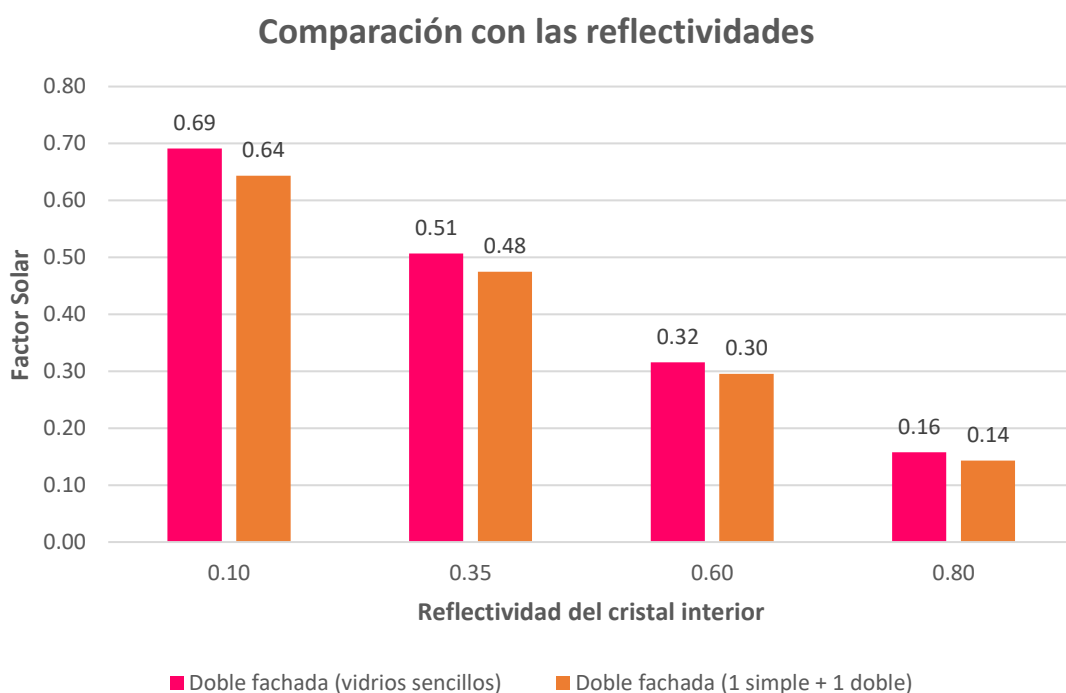
el mejor caso es este último. Ciertamente, que al añadir un cristal doble interior incrementa los costes de la fachada. En cuanto al factor solar, seguimos viendo que se mantiene igual al anterior prácticamente.

Con esto hemos visto cómo aislar térmicamente un edificio, sin embargo, no hemos podido reducir la ganancia solar en el local. Para ello será necesario modificar las propiedades ópticas del cristal interior y ver cómo influye esto en la ganancia de calor solar global de la envolvente.

Variación de la reflectividad del cristal interior

A la hora de variar las propiedades ópticas de los cristales, estudiaremos dos casos. La doble fachada formada por cristales simples, y la doble fachada formada por un cristal interior doble. En el estudio anterior hemos podido comprobar que estas dos configuraciones son mejores para el aislamiento térmico del edificio. Ahora queremos ver cómo influyen las propiedades ópticas de los cristales.

***Nota:** al variar las propiedades ópticas de los cristales, sólo modificamos la reflectividad y la transmisividad del material. La absorptividad de un cristal se mantiene constante ($\alpha = 0.15$).



Gráfica 2: Comparación del factor Solar para diversas reflectividades del vidrio interior para una DFA normal y otra con vidrio doble interior.

Observaciones:

En esta gráfica podemos observar que variando la reflectividad del cristal interior se consigue disminuir considerablemente el factor solar, lo que implica una disminución del calor en el interior del edificio.

Por otro lado, comparando las dos configuraciones de doble fachada vemos que la diferencia con la que varía el factor solar una respecto a la otra es muy escasa.

De aquí se pueden sacar dos conclusiones; a nivel económico, se optaría por una doble fachada formada por dos vidrios simples puesto que es más barato; pero a nivel de aislamiento térmico, como hemos podido ver en la gráfica anterior, la doble fachada con vidrio interior parece la alternativa más apropiada, aunque sea más caro.

***Nota:** se ha de tener en cuenta la reflectividad que emite la envolvente del edificio. Según marca la normativa (CTE, 2006), un edificio no debe reflejar más del 0.6 – 0.7 de radiación solar.

Este sería un análisis para una doble fachada. En nuestro caso, como ya hemos comentado anteriormente, dispondremos de una persianas donde dentro circulará agua y del que aprovecharemos el calor atrapado en la cavidad para calentarlo y obtener ACS. Así pues, para nuestro estudio nos interesa que el cristal interior refleje la radiación solar y ésta choque contra la superficie interior de las persianas y lo caliente. Con el uso de estas persianas disminuimos considerablemente el factor solar global de la envolvente. Nos interesa saber si con esta nueva configuración se obtiene un aprovechamiento energético.

Conclusiones:

Mediante este pequeño estudio hemos podido ver cómo podemos disminuir el calor entrante e nuestro edificio; mediante la reducción del factor – U y la reducción del factor Solar (SHGC), simplemente cambiando la configuración de la fachada y la reflectividad de los cristales respectivamente. Hemos podido ver que la mejor opción son los dos últimos casos; doble fachada de vidrios simples y doble fachada de cristal simple más uno doble.

Otras formas de disminuir la transferencia de calor (factor – U) son:

1. **Minimizando la radiación del conjunto:** mediante la implantación de una película de baja emisividad sobre la superficie del vidrio.

***Nota:** en la ecuación (Ecuación 0.22) hemos podido ver al disponer de dos cristales, la emisividad del conjunto baja considerablemente.

En donde el valor de emisividad para un vidrio común es de 0.84. Por lo tanto, la emisividad efectiva del conjunto será de 0.72. En el caso que se recubra ambos cristales con una capa de baja emisividad, por ejemplo de 0.1, entonces la emisividad efectiva del conjunto se verá también reducida dando un valor de 0.05. Incluso cuando sólo se implementa la capa de baja emisividad en uno de los cristales este valor sigue siendo pequeño, dando como resultado una emisividad de 0.09, por lo que económicamente sale más rentable.

2. Aumentando la distancia del aire atrapado.

En el caso del vidrio doble, a medida que aumentamos el espacio de aire aumenta la resistencia al flujo de calor por conducción pues:

$$R_{cond} = \frac{L}{k}$$

Donde L es la distancia del aire atrapado.

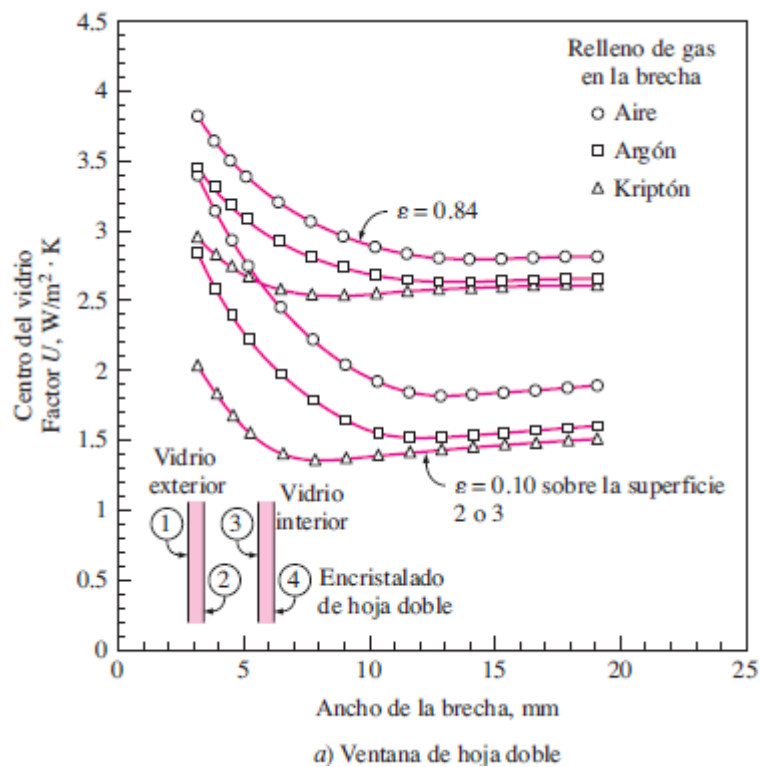
La idea apunta que cuanto más aumentemos la distancia L , mejor será para nuestro edificio, pero estudios experimentales (Porcar, 2015) han señalado que cuando se sobrepasa un espesor de 13mm entonces ya no sigue esta regla, pues a partir de aquí se producen corrientes de convección que lo que hacen es ayudar a la transferencia de calor. Por lo tanto, es conveniente que esta distancia se mantenga entre los intervalos de 6mm y 13mm. Una idea sería recubrir las capas de los cristales con un tipo de poliéster que lo que hacen es evitar que se produzcan estas corrientes de convección, e incluso usando ventanas de hojas triples o cuádruples, pero dicha idea queda fuera del alcance de este proyecto.

3. En la cavidad entre vidrios usar un fluido aún menos conductor que el aire, como por ejemplo el argón o el Kriptón:

$$k_{aire} = 0.026 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

$$k_{argón} = 0.017 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

$$k_{kriptón} = 0.0095 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$



Gráfica 3: Variación del factor U a medida que aumenta el ancho de la cavidad entre vidrios, y para diferentes emisividades.

***Nota:** en esta gráfica también se muestra cómo a medida que aumentamos el espesor de la cavidad, el factor U se mantiene constante. Por lo que, como hemos dicho, es mejor que este varíe de 6 – 13 mm.

En el caso que se utilice estos materiales, se debería asegurar el cierre completo de la cavidad de aire para evitar la más mínima fuga. Esto no suele ser práctico y puede suponer costes económicos elevados.

Por último, otra opción sería vaciar por completo el fluido que se encuentra en esta cavidad pues la conducción y la convección requieren de un medio para llevarse a cabo. Esta idea la intentaremos desarrollar en nuestro proyecto sin llegar al vacío absoluto pues los vidrios no están preparados para soportar presiones elevadas.

1.13. Balance de energía de la DFA (Caso de estudio)

Antes de efectuar el balance energético en la DFA de estudio es conveniente conocer los agentes que influyen en el balance energético de estudio.

- **Radiación Solar (I):** depende de diversos factores tales como: la orientación de la fachada, su situación geográfica, su geometría, de las condiciones meteorológicas, de la época del año, de sus protecciones solares o similares, y de las características térmicas de los elementos constructivos que la componen.
- **Intercambio de calor con el ambiente exterior:** al existir una diferencia de temperatura entre el ambiente exterior y el interior del edificio da lugar a un intercambio de calor que pasa por los tres mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección, radiación).
- **Intercambio de calor del agua que circula en las persianas:** debido al gradiente de temperatura que hay entre las persianas de aluminio y el agua que circula a través de él se produce una transferencia de temperatura por conducción y convección.

Por lo tanto, podemos observar que tenemos dos tipos de balance de energía que podemos establecer:

- **Balance de energía para sistemas de flujo estacionario:** en este caso se refiere al intercambio de calor en el agua que circula a través de las persianas debido a la radiación solar y al aire que envuelve el aluminio. Entonces esto queda de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}c_p\Delta T \text{ (W)} \quad \text{(Ecuación 0.46)}$$

Con esta fórmula podemos determinar el flujo de calor que gana el agua. Disponemos de todos los datos. Las temperaturas se toman de la entrada y la salida de las persianas.

***Nota:** Esto lo tendremos en cuenta a la hora de realizar nuestras simulaciones en Fluent. Antes de realizar la transferencia de calor, haremos una simulación previa que consistirá sólo en hacer circular agua a través de las persianas en régimen estacionario y contemplará la viscosidad. Una vez realizada esta simulación ya podemos realizar la simulación de transferencia de calor, de esta manera cuando los rayos choquen contra las persianas ya habrá agua en estado estacionario entre las persianas.

- **Balance de energía en la superficie:** como ya hemos comentado, la energía se transfiere por conducción, convección y radiación. Pero una superficie no contiene masa, y por lo tanto, tampoco energía. Así pues, tomamos una superficie como un sistema ficticio cuyo contenido de energía permanece constante (actuaría como en régimen estacionario). Así pues, el balance de energía quedaría como:

$$\dot{E}_{entrante} = \dot{E}_{saliente}$$

***Nota:** en el balance energético no tendremos en cuenta ningún sistema de climatización externo ni fuentes de calor internas del edificio tales como la iluminación, la ocupación, los equipos, las personas, etc. y consideramos el sistema completamente cerrado (sin entradas ni salidas de aire).

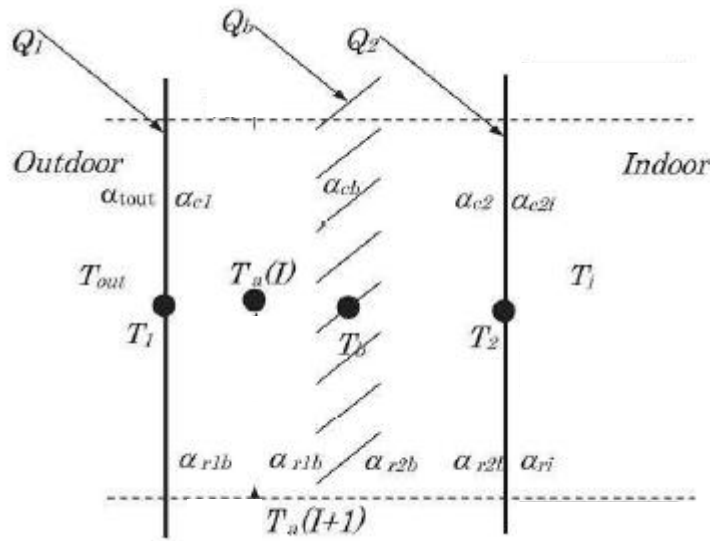


Figura 22: Representación gráfica de la configuración con cristales simples y persianas en la cavidad, mostrando las diferentes temperaturas en cada región.

Así pues, en nuestro estudio disponemos de 3 superficies las cuales podemos definir el balance de energía para cada uno:

- **Balance de energía del cristal exterior:**

$$U_{combinado,1}(T_{\infty} - T_1) + h_{a1}(T_a - T_1) + \varepsilon_1\sigma(T_b - T_1)^4 + I_{abs,1} = A \quad (\text{Ecuación 0.47})$$

- **Balance de energía del cristal interior**

$$U_{combinado,2}(T_{int} - T_2) + h_{a2}(T_a - T_2) + \varepsilon_2\sigma(T_b - T_2)^4 + I_{abs,2} = B \quad (\text{Ecuación 0.48})$$

- **Balance de energía de las persianas** (el símbolo b se refiere a las persianas)

$$2k_b \propto_b (T_a - T_b) + \varepsilon_b\sigma(T_1 - T_b)^4 + \varepsilon_b\sigma(T_2 - T_b)^4 + I_{abs,b} = 0 \quad (\text{Ecuación 0.49})$$

Como se puede ver, para los tres casos se contempla lo mismo. Del cristal exterior entran los rayos del sol en forma de ondas electromagnéticas dando lugar a la transferencia de calor por radiación y convección. Luego, parte de este calor es absorbida. De la parte absorbida en el caso del cristal exterior, la energía se disipa mediante la convección de la superficie del elemento con el cristal exterior (cuyo caso, siempre habrá un valor) y por último, mediante radiación, pues los cristales están a una temperatura mayor del exterior.

Estrategia de simulación

1.14. Introducción

Para poder ver la viabilidad de nuestro planteamiento y obtener el caso óptimo de DFA de nuestro estudio localizado en Barcelona realizaremos un estudio paramétrico donde estableceremos con exactitud las variables con las que vamos a trabajar y en qué rango se moverán. Así como también los parámetros de salida con los que podremos trabajar.

Variables del modelo

Los variables del Caso Base que vamos a modificar para realizar el estudio paramétrico serán:

- El caudal de agua que circula dentro de las persianas. Variando la velocidad de circulación se consigue variar el número de Reynolds, y veremos así cómo influye éste en los resultados.
- El volumen de la cavidad donde tiene lugar el aprovechamiento energético.
- La reflectividad de los materiales que actúa dentro de la cavidad para aprovechar al máximo la energía del Sol.
- El sentido de las persianas. De arriba abajo o a la inversa.
- El estado de la cavidad. Para el caso base trabajaremos con nitrógeno, y veremos cómo actúa en el vacío.
- Por último, en el tamaño de las persianas. veremos si haciéndolas más grandes o más pequeñas o modificando su geometría conseguimos resultados viables.
- La emisividad de los cristales que conforman las persianas.

El resto de los parámetros que conforman el modelo, como las condiciones ambientales tanto en el exterior como en el interior y los elementos constructivos se mantendrán constantes para todas las simulaciones.

Parámetros de salida

Los parámetros que nos interesa obtener en la salida son principalmente dos:

- La cantidad de calor que entra en el interior del edificio.
- La temperatura a la salida de las persianas, así vemos la cantidad de calor transferida y si es necesaria su aplicación.

El objetivo a la hora de añadir las condiciones de contorno y los parámetros con los que trabaja Fluent, es intentar que todo el conjunto en sí se acerque mucho a la realidad, eso sí, aplicando una cierta simplicidad y pasando de largo de pequeños detalle sin importancia, pues lo único que provocarían en nuestro estudio sería costes de tiempo de simulación y riesgo de tener algún tipo de error.

***Nota importante:** Como ya se ha comentado anteriormente, haremos dos simulaciones para cada caso. El primero será de flujo estacionario sin contemplar la radiación ni energía, sólo la viscosidad del agua que circula por las persianas y luego una vez realizada ésta podemos hacer ya la simulación de transferencia de calor activando las ecuaciones de radiación y energía. De esta manera nos aseguramos que cuando haga la simulación de transferencia de calor ya haya agua circulando en estado estacionario.

1.15. Configuración del caso base

Para el caso base se escogerá una configuración determinada y se comparará con cada una de las variaciones antes mencionadas. En la siguiente tabla se puede apreciar las variaciones con más exactitud que se llevará a cabo en nuestro estudio paramétrico.

Estudio paramétrico en el CFD			
Parámetro	Unidades	Caso base	Variaciones
Ancho de la cavidad	m	0.28	0.52 – 0.76
Tamaño de las persianas	m^2	150 x 10	200 x 10
Reflectividad*	%	80	60 – 35 – 10
Número de Reynolds*	-	2000	8000 – 12000 – 16000
Emisividad del cristal interior	-	0.89	0.05 – 0.25 -0.65
Sentido de flujo de las persianas	-	De arriba a abajo	De abajo a arriba

Tabla 10: Variaciones de los parámetros que se llevará a cabo en el presente estudio.

***Nota 1:** la variación de la reflectividad hace referencia a los cristales verticales y horizontales y al cristal interior. El cristal exterior se queda como cristal estándar

***Nota 2:** el número de Reynolds se refiere al agua que circula por las persianas. Incorporaremos esta idea al Fluent mediante la velocidad del fluido a través de las persianas aplicando la fórmula de Reynolds (ANEXO).

A partir de aquí se realizará el estudio paramétrico y se escogerá el caso más óptimo.

1.15.1. Características geográficas

El estudio que vamos a llevar a cabo se refiere a una fachada de un edificio de oficinas ubicado en Barcelona con las coordenadas 41.23°N – 2.11°E y orientación Sur.

En cuanto a los datos climáticos se refiere, se decidió analizar los valores para el día más desfavorable, esto es, se ha escogido los datos del día 17 de Julio (Institut Català d'Energia, 2001) para la ubicación antes dada y se ha representado en un gráfico de dispersión. A partir de estas temperaturas, se hizo una aproximación válida a una función de grado 6 (con una correlación superior del 85%) que será la que importemos al Fluent para trabajar con la temperatura que recibe el cristal exterior.

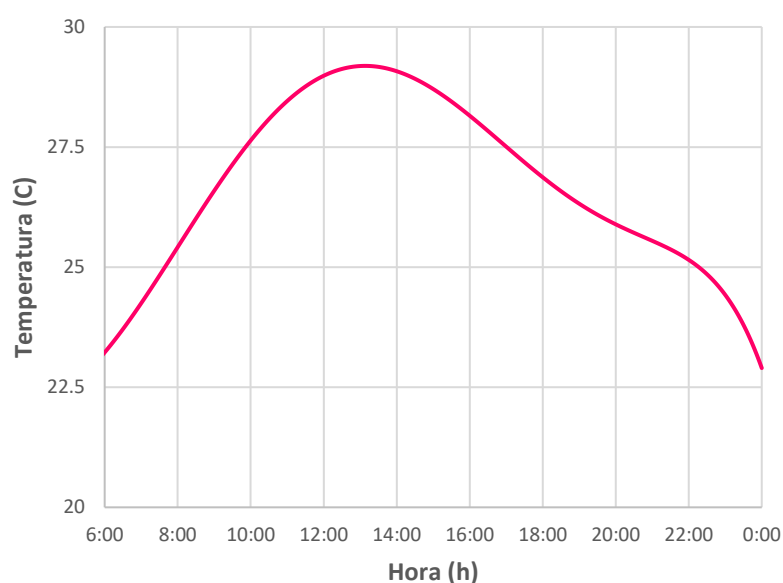


Figura 23: Representación gráfica de la temperatura entre las 6 y las 0:00 para el 17 de Julio en Barcelona.

Cuya fórmula corresponde a:

$$y = -2.64 \cdot 10^{-27}x^6 + 6.67 \cdot 10^{-22}x^5 - 5.97 \cdot 10^{-17}x^4 + 2.12 \cdot 10^{-12}x^4 + 2.12 \cdot 10^{-12}x^3 - 1 - 79 \cdot 10^{-8}x^2 - 1.88 \cdot 10^{-4}x + 297.41$$

1.15.2. Geometría

El modelo a estudiar consiste en una doble fachada acristalada formada por 1 cristal exterior y un cristal interior (tabique), además de persianas entre la cavidad. Para su diseño 3D, se ha optado por elaborarlo mediante el programa SolidWorks 2014, pues es una herramienta sencilla e intuitiva para realizar dibujos en 3D.

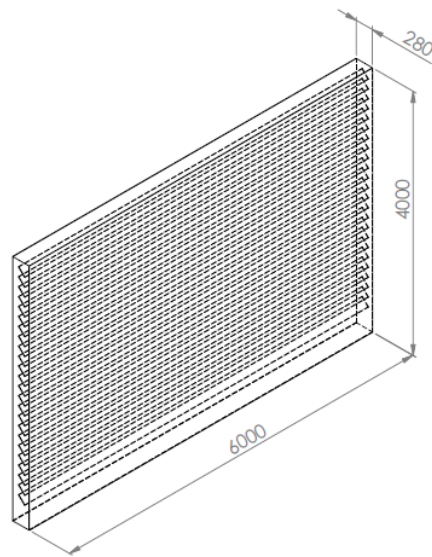


Figura 24: Representación gráfica de la fachada de estudio. Elaborado con Solidworks 2014.

1.15.3. Mallado

Para el mallado de nuestra DFAV se ha optado por el uso del Gambit, pues es una buena herramienta para mallar cuerpo y permite su control de forma más detallada y precisa. A parte va muy bien para estudio de fluidos y transferencia de calor.

Este es un punto importante pues si nuestra malla no es correcta o no está bien planteada nos puede dar problemas de simulación. Para evitar eso se ha tenido en cuenta diferentes aspectos:

1. El número mínimo de elementos para simular la transferencia de calor entre dos superficies varía entre 5 – 8. En nuestro caso lo hemos dejado a 10 elementos, que se han tenido en cuenta en los espesores de los cristales y en el espacio entre cristales como puede verse en la siguiente figura.
2. La comunicación de las mallas de diferentes cuerpos que son adyacentes entre si. Es decir, se intenta realiza un mallado de compatibilidad: por ejemplo, los nodos del cristal interior coincide con los nodos del aire que está entre los cristales.
3. Se ha tenido en cuenta la capa límite de los fluidos, tanto para el agua que circula en el interior de las persianas como el aire que se encuentra en la cavidad. Esto significa que el tamaño de los elementos del fluido (agua, aire) que se aproxima a la superficie del solido se ha ido disminuyendo debido a la capa límite.
4. En principio, la malla se mantendrá la misma para cada variable que se vaya a realizar pues estos no dependen de la geometría. Esto es válido excepto para cuando aumentamos el volumen de la cavidad, pues la geometría habrá cambiado y por lo tanto se deberá mallar de nuevo. Esto se puede hacer enfocando esta malla solo a la cavidad, pues el resto de la geometría se mantiene igual. Los elementos referidos a la capa limite también se mantendrán en principio iguales. Y a continuación se volverá a validar los resultados para asegurarnos que nuestra nueva malla es correcta.

1.15.4. Materiales y propiedades

Propiedades de los sólidos						
Elementos	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg*K)	k (W/m*K)	ε	α	τ
Vidrio* (e=0.006m)	2500	795	1.16	0.89	0.15	0.78
Persianas (aluminio)	2719	871	169	0.15	0.45	-

Tabla 11: Propiedades físicas y ópticas de los sólidos que tienen lugar en nuestro caso de estudio.

***Nota:** Las propiedades del vidrio irán variando según el caso que se simule, pero el cristal exterior se mantendrá igual para todos los casos.

Propiedades de los fluidos				
Elementos	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg*K)	k (W/m*K)	μ (kg/m*s)
Aire	Gas ideal incompresible	1006.43	0.0242	Power-Law
Agua	998.2	4182	0.6	0.001003

Tabla 12: Propiedades físicas de los fluidos.

1.15.5. Condiciones de contorno

Antes de llevar a cabo cualquier tipo de simulación se ha de definir unas condiciones de contorno que tendrá en cuenta el programa a la hora de realizar los cálculos. En este caso, estableceremos al programa Fluent condiciones de contorno referidas a la velocidad de entrada del fluido (agua a través de las persianas), materiales, propiedades físicas y ópticas de los elementos constructivos, condiciones ambientales (función de temperatura), radiación solar y influencia de los mecanismos de transferencia de calor para cada uno de estos elementos.

***Nota:** El software Fluent 16.0 trabaja con una base de datos climáticos correspondiente a la radiación solar global y difusa, la temperatura del aire exterior, la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. Esto se aplica a la localización del edificio (latitud, longitud y altitud)

En las tablas siguientes se puede ver de forma más resumida y visual las condiciones de contorno que hemos tenido en cuenta para el estudio de la simulación

Inlet	Caudal másico	En este caso, se variará la velocidad con la que circula el agua y de esta manera su número de Reynolds.
Outlet	Salida de presión	El agua tiene que salir a presión ambiente, o lo que es lo mismo, a presión relativa igual a 0.

Tabla 13: Condiciones de contorno para entrada y salida del agua.

Capas	T (K)	h_{conv} (W/m ² · K)	ε	α	τ
Cristal interior	298	8	Variable		
Cristal exterior	Función de temperatura	12	0.89	0.15	0.78
Caras verticales			Variable		
Caras horizontales					
Temperatura del agua a la entrada	293				

Tabla 14: Condiciones de contorno en los cristales que forman la DFA.

1.15.6. Configuración numérica del Solver

Configuración numérica del Solver				
SETUP	General	Malla	Mallado de sólidos	Hexaédricas con un tamaño: Sólido: 2mj mm x 12mm x 1mm Líquido: 30 mm x 12,5 mm x 1 mm
			Mallado de líquidos	Lo mismo ocurre para los líquidos pero con la implementación de capa límite
		Solver	Tipo de Solver	Estudio basado en precisión
	Estado estacionario			
	Velocidad como vector de velocidad absoluta			
	Modelos	Viscosidad	RNG k-e (Coussirat, y otros, 2008)	Con tratamiento mejorado en el contacto con la pared, efectos térmicos y con la activación de fuerzas de flotabilidad.
Modelo de radiación		Radiación solar P-1 (Coussirat, y otros, 2008)	Con calculadora solar con un factor espectral de 0.5, y en la ubicación seleccionada (Barcelona).	
Solution	Método de solución	Tipo de precisión	Todas las ecuaciones trabajan a presión basada en doble precisión.	
			Trabajamos con PISO, debido a que es el más apropiado para trabajo con flujos afectados por el efecto de la flotabilidad (Guardo, Coussirat, Egusquiza, Alavedra, & Castilla, 2008).	
		Esquema de discretización	Primer orden para momentos.	
			Segundo orden para las ecuaciones de transporte (momento, energía y turbulencia).	
	Método de control	Factores de relajación debajo de 0.8		
Monitores	Monitores de estudio	Calor que atraviesa el cristal interior		
		Temperatura del agua en la Outlet.		
	Monitores residuales	Todo 1e-5 excepto para la radiación solar que será 1e-6		
Calculation	Monitores residuales		Temperatura en la superficie de las ventanas	
	Cálculo de actividades	Paso de tiempo		120 s
		Número de iterancias		480
		frecuencia		20

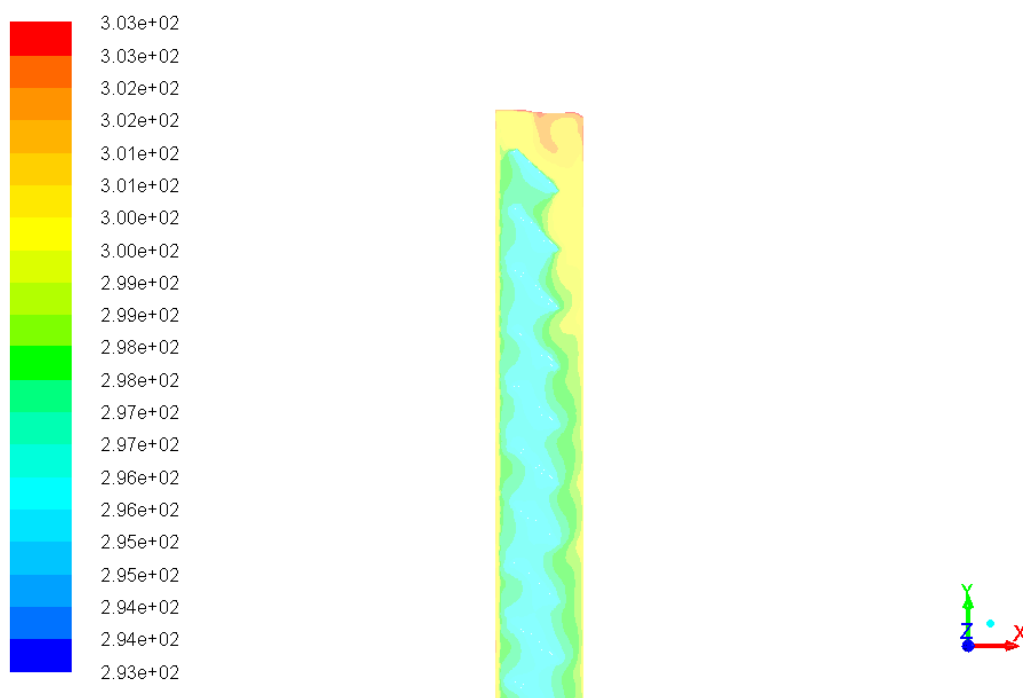
1.15.7. Configuración de la calculadora Solar

Características		Orientación de la fachada		
Longitud	2.11º	Orientación	Sur	
Latitud	41.23º	Coordenadas	X	1
Zona horaria	GMT + 1		Y	0
Día	17 de Julio		Z	0
Hora	0:00			

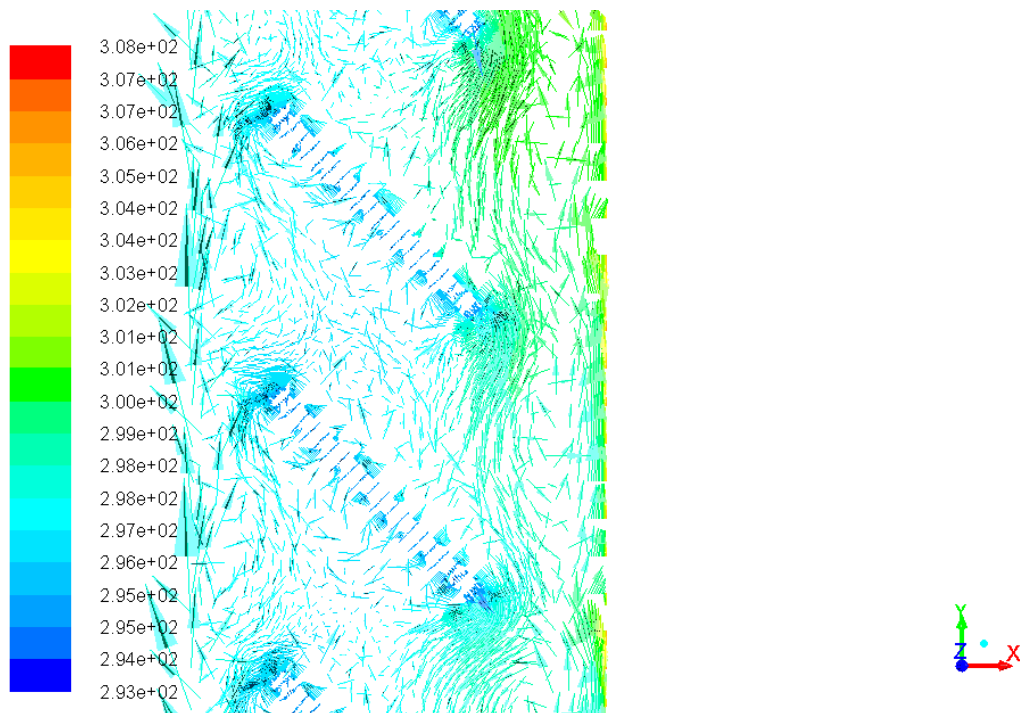
Tabla 15: Configuración de la ubicación del edificio con sus respectivas coordenadas y orientación para la calculadora solar de Fluent 16.0.

Resultados

1.16. Resultados obtenidos del caso base



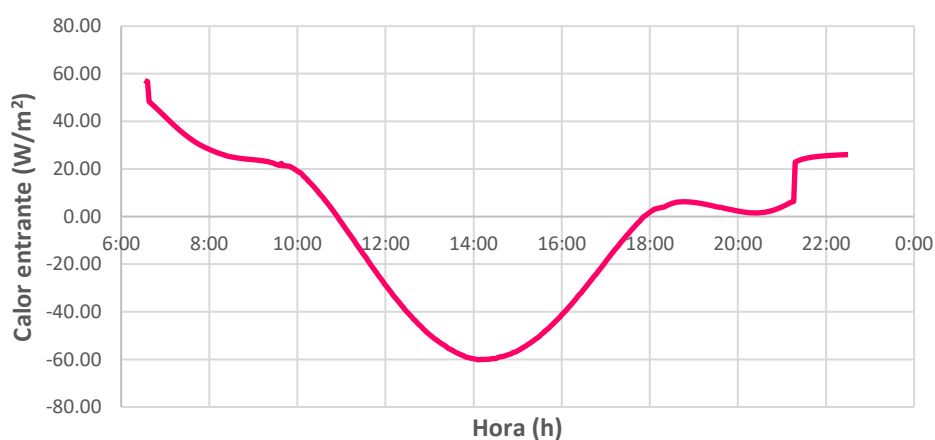
Gráfica 4: Contorno de temperatura estática expresada en Kelvin para el Caso_Base.



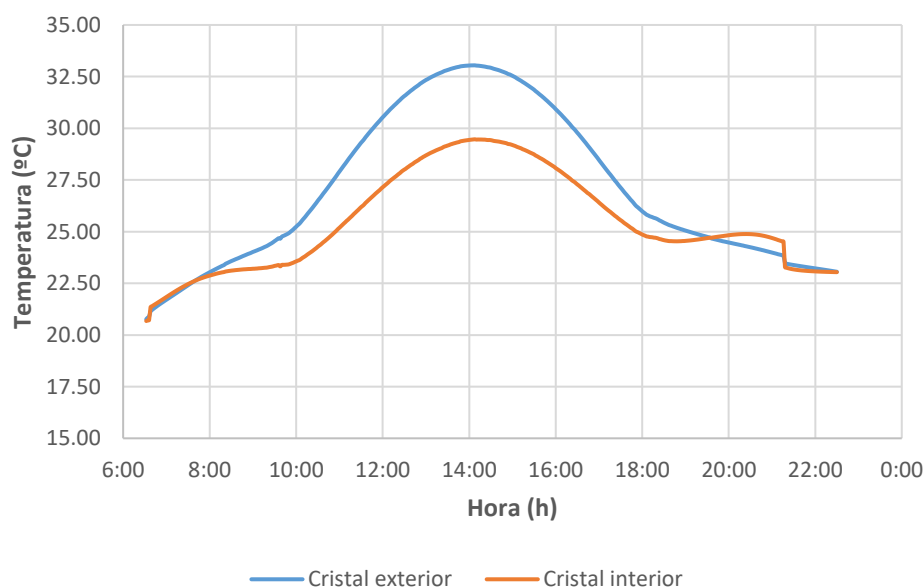
Gráfica 5: Vectores de velocidad con temperatura.

Observación:

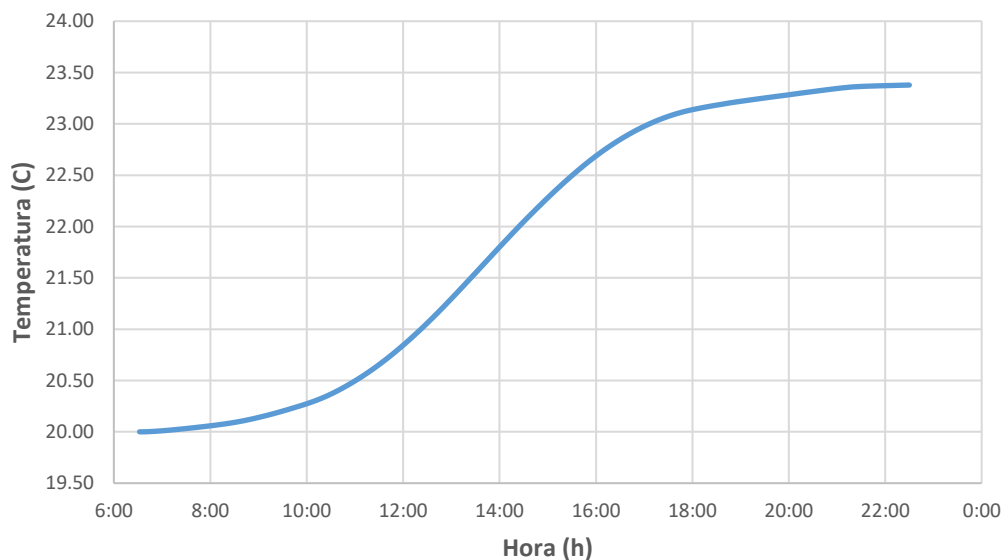
Tal y como se ha hablado anteriormente, podemos apreciar efectos de flotabilidad. El fluido que está dentro de nuestra fachada está en movimiento, donde el más caliente tiende a subir y el frío a bajar. Esto es debido a la diferencia de temperatura que hay en la cavidad. El fluido más cercano al cristal exterior (superficie más caliente) tiene mayor temperatura y por lo tanto tiende a subir debido a que la densidad es más pequeña. Así pues, podemos afirmar que el calor transferido al cristal interior es mediante convección natural y no por conducción pura.



Gráfica 6: Calor entrante al interior del edificio. El signo negativo indica calor entrante y el positivo, saliente.



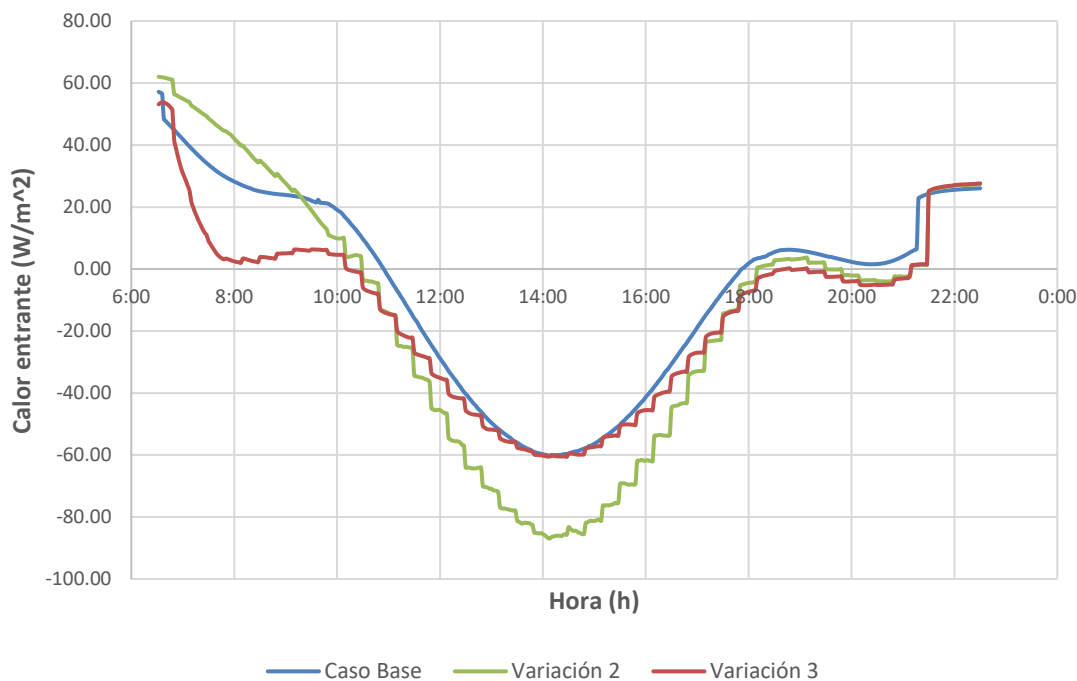
Gráfica 7: Temperaturas superficiales en el cristal interior y exterior de la fachada.



Gráfica 8: Temperatura a la salida del agua para el caso Base.

1.17. Variaciones del Caso Base (Estudio paramétrico)

1.17.1. Variación del volumen de la cavidad

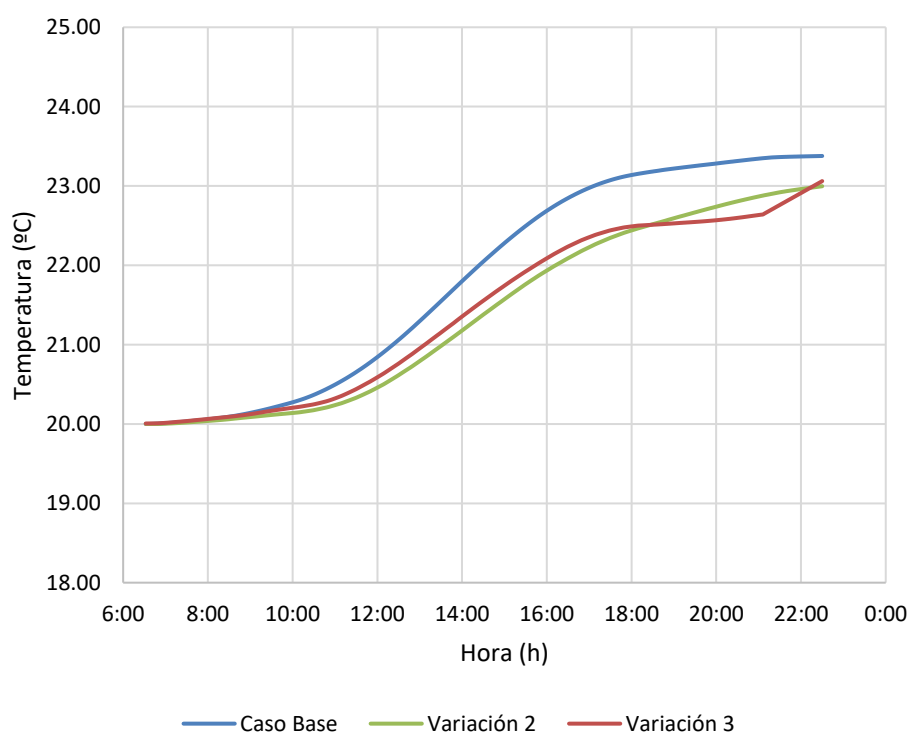


Gráfica 9: Calor entrante para diferentes tamaños de la cavidad.

		Calor entrante	Calor saliente
		(KJ/m ²)	(KJ/m ²)
CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 7	V= 0.52	-1450.479	591.732
CASO 8	V=0.76	-1078.966	235.703

Tabla 16: Calor entrante y saliente en la fachada para diferentes volúmenes de la cavidad.

En principio todo nos indica que el caso Base es la mejor opción. El motivo puede ser debido a que la posibilidad de que se creen corrientes de convección es muy pequeña, ya que los otros al disponer de más volumen hay más posibilidad de que se produzca este fenómeno, es decir, el número de Nusselt será mayor y por lo tanto más transferencia de calor. Si fuese por conducción pura sería lo ideal pues el aire como aislante tiene un valor de resistencia térmica muy pequeña comparado con la convección.



Gráfica 10: Temperatura del agua para diferentes tamaño de la cavidad.

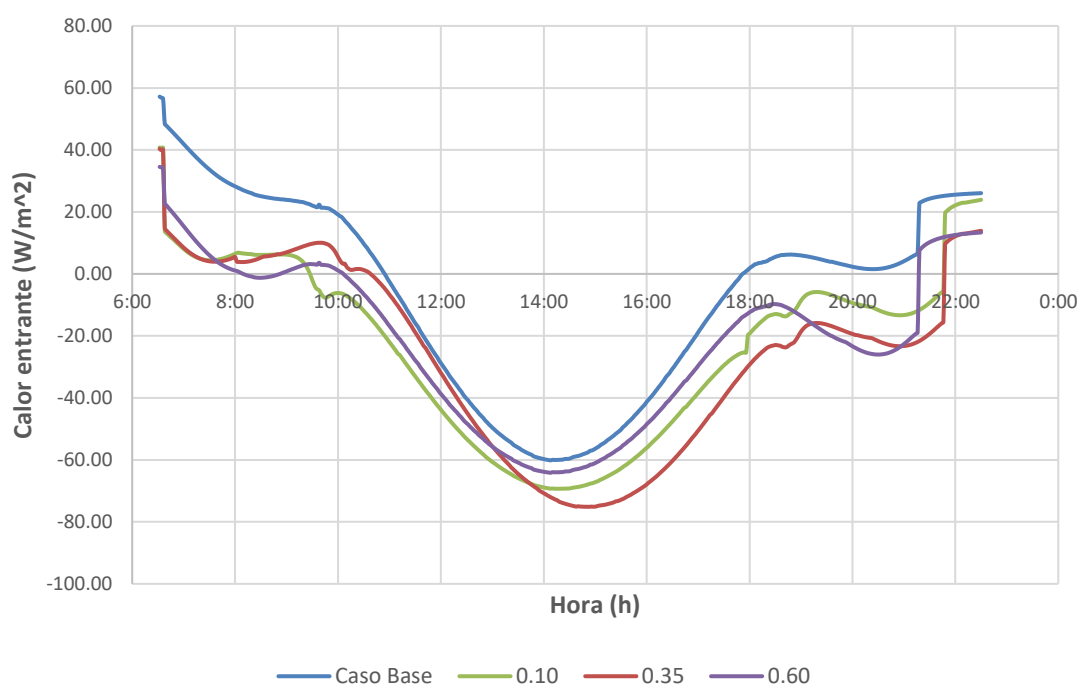
***Nota:** Siendo Variacion 2 = ancho de la cavidad 0.52m, y Variación 3 = ancho cavidad 0.76 m.

		Temperatura salida agua	Calor absorbido
		(KJ/m ²)	kW
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 7	V=0.52	22.98	2.00
CASO 8	V=0.76	23.06	2.05

Tabla 17: Temperatura respecto al tamaño de la cavidad.

En lo que a temperatura del agua respecta, podemos apreciar que ésta aumenta 3 grados para las 3 configuraciones aproximadamente. Por lo tanto, la variación de las propiedades geométricas no afecta en gran medida este fenómeno. Sin embargo podemos ver que sí tiene importancia cuando realizamos variaciones de reflectividades. El incremento de la temperatura del agua es importante pues los rayos de Sol al penetrar la primera barrera (cristal exterior) se encuentran con cristales que poseen alta reflectividad por lo que estos rayos solares rebotan y quedan retenidos en la cavidad, donde la placa de aluminio absorbe gran parte de esta calor.

1.17.2. Variación de la reflectividad

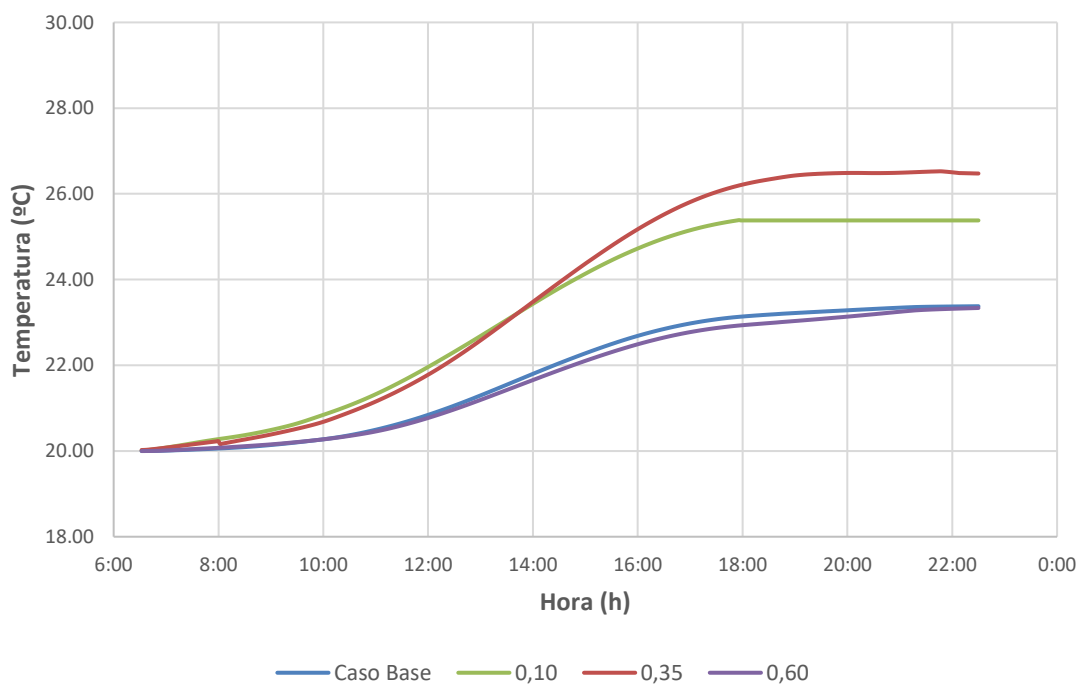


Gráfica 11: Calor entrante para diferentes tipos de reflectividades.

		Calor entrante	Calor saliente
		(KJ/m ²)	(KJ/m ²)
CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 1	r=0.10	-1480.19	116.43
CASO 2	r=0.35	-1625.913	127.854
CASO 3	r=0.60	-1072.833	266.138

Tabla 18: Calor entrante para diferentes tipos de reflectividades.

En cuando a la calor entrante en el edificio, vemos que la mejor opción es la del caso base con una reflectividad del 0.80. El problema que nos podemos encontrar al aplicar esta idea es que la luz visible que entre en el interior del edificio sea escasa. Por lo que los cristales interiores, verticales y horizontales, cuya reflectividad es de 0.60 parecen ser una buena opción.



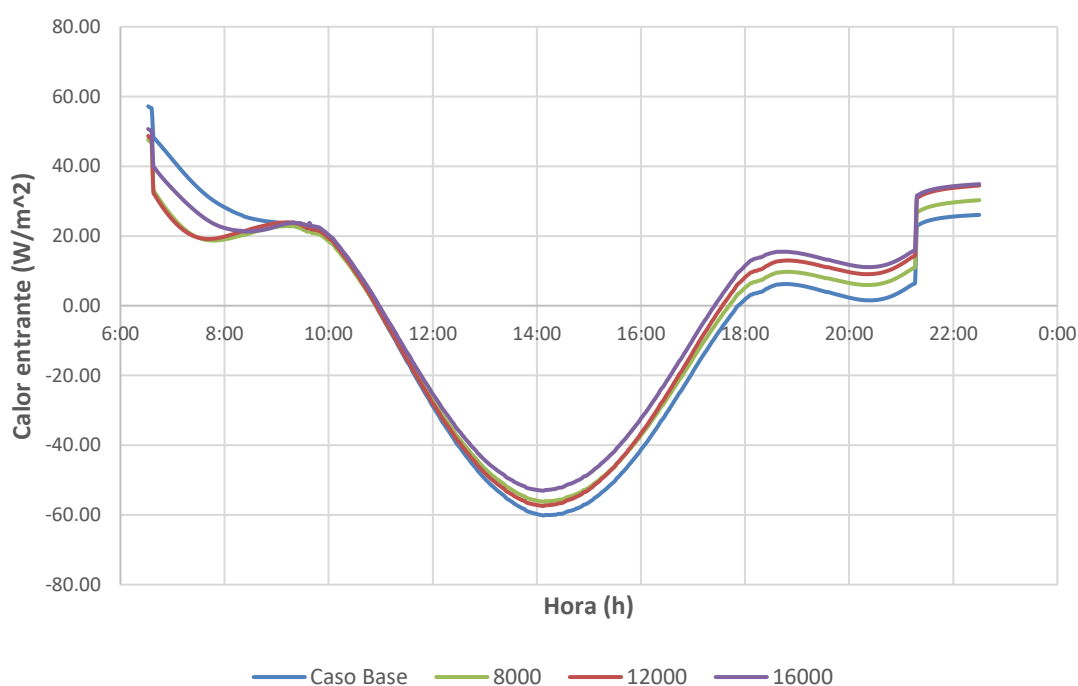
Gráfica 12: Temperatura a la salida del agua para diferentes reflectividades.

		Temperatura salida agua	Calor absorbido
		(KJ/m ²)	kW
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 1	r=0.10	25.38	3.61
CASO 2	r=0.35	26.47	4.34
CASO 3	r=0.60	24.04	2.71

Tabla 19: Calor entrante para cada reflectividad.

Aquí sucede algo bastante curioso. Al realizar las simulaciones obtenemos que la temperatura del agua aumenta considerablemente cuando los cristales interiores, verticales y horizontales tienen una reflectividad del 0.35. La temperatura máxima alcanzada es de 26°C aproximadamente. Eso es demasiado y por lo tanto se puede aprovechar esto para la obtención de agua caliente sanitaria. Por otro lado, vemos que cuando la reflectividad es muy elevada (0.60 – 0.80) el agua no aumenta mucho su temperatura.

1.17.3. Variación del número de Reynolds en las persianas

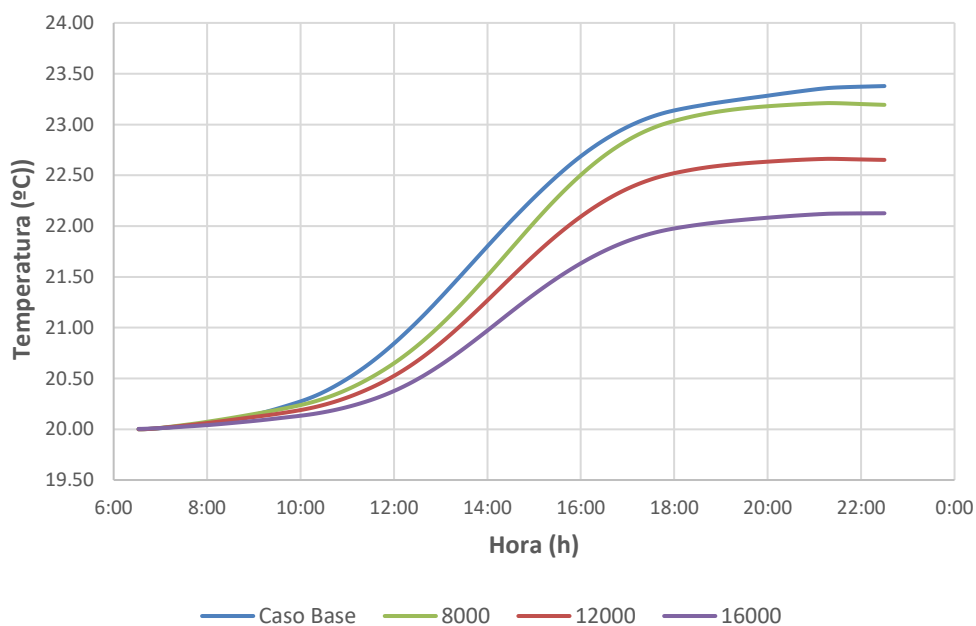


Gráfica 13: Calor entrante para diferentes Reynolds en el agua que circula en las persianas.

Calor entrante	Calor saliente
(KJ/m ²)	(KJ/m ²)

CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 4	R=8000	-851.922	537.258
CASO 5	R=12000	-854.132	602.673
CASO 6	R=16000	-764.919	675.82

Tabla 20: Calor entrante con variación del número de Reynolds.

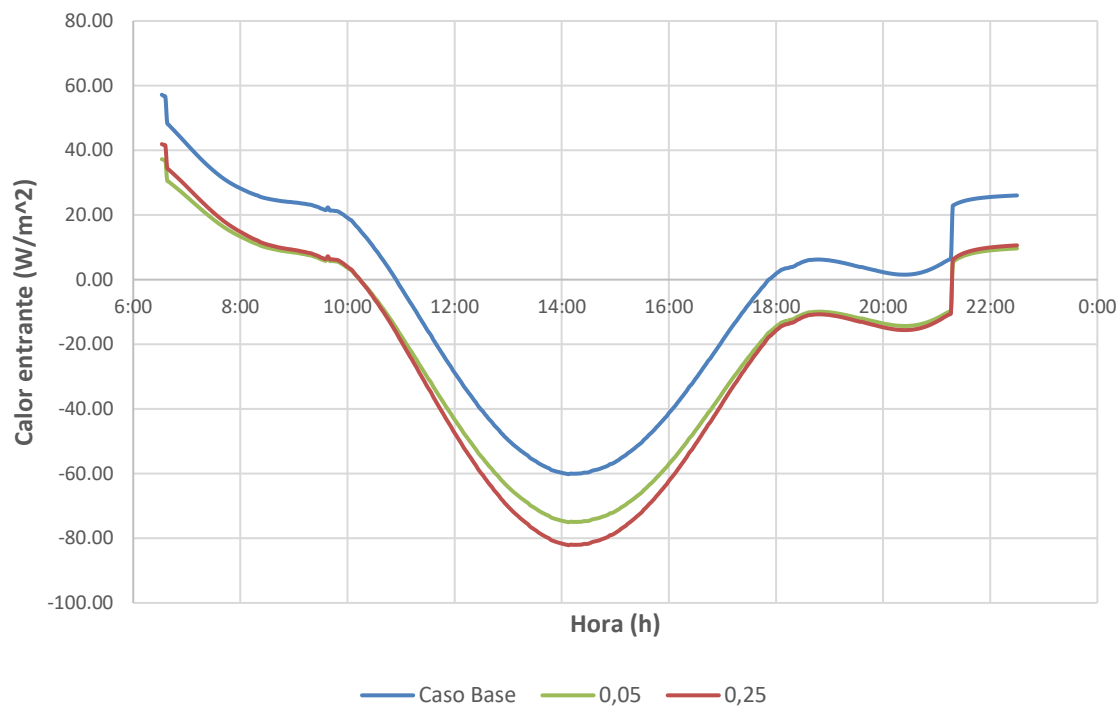


Gráfica 14: Temperatura a la salida del agua para diferentes números de Reynolds.

		Temperatura salida agua (KJ/m ²)	Calor absorbido kW
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 4	R=8000	23.19	8.56
CASO 5	R=12000	22.65	10.67
CASO 6	R=16000	22.13	11.44

Tabla 21: Temperatura y calor absorbido por el agua en las persianas.

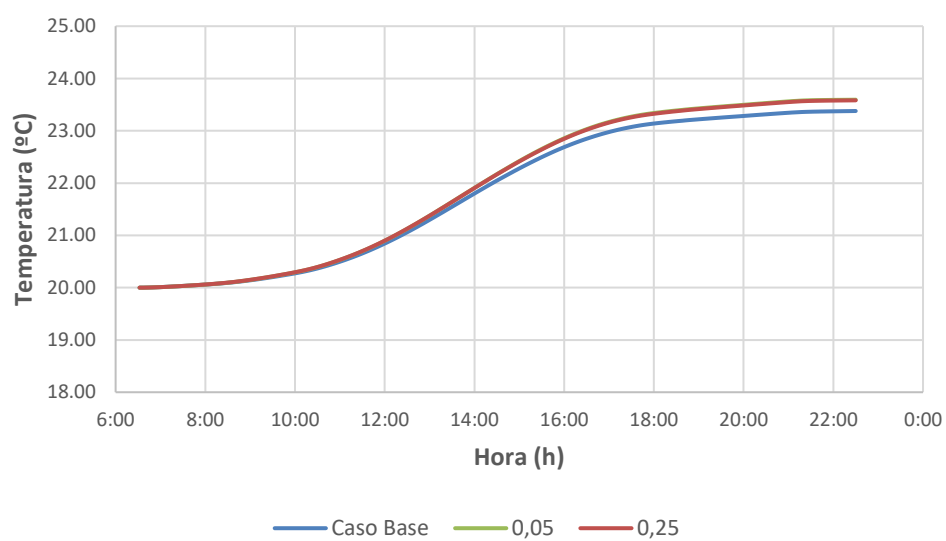
1.17.4. Variación de la emisividad del cristal interior



Gráfica 15: Calor entrante para diferentes emisividades.

		Calor entrante (KJ/m²)	Calor saliente (KJ/m²)
CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 9	e=0.05	-1477.364	217.582
CASO 10	e=0.25	-1613.96	237.22

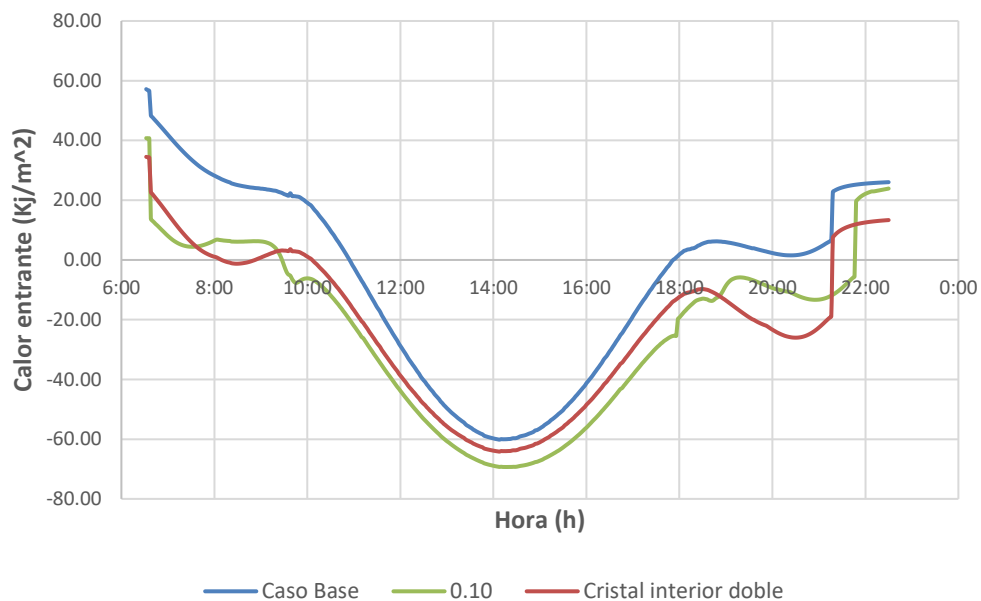
Tabla 22: Calor entrante en función de la emisividad del vidrio interior.



Gráfica 16: Temperatura a la salida del agua para diferentes emisividades.

		Temperatura salida agua (KJ/m ²)	Calor absorbido kW
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 9	e=0.05	23.59	2.41
CASO 10	e=0.25	23.58	2.40

1.17.5. Comparación con una doble fachada con cristal interior doble



Gráfica 17: Calor entrante del caso base con un cristal interior de vidrio doble.

		Calor entrante (KJ/m²)	Calor saliente (KJ/m²)
CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 11	Vidrio doble	-1371.725	114.284

Tabla 23: Calor entrante del vidrio interior doble.

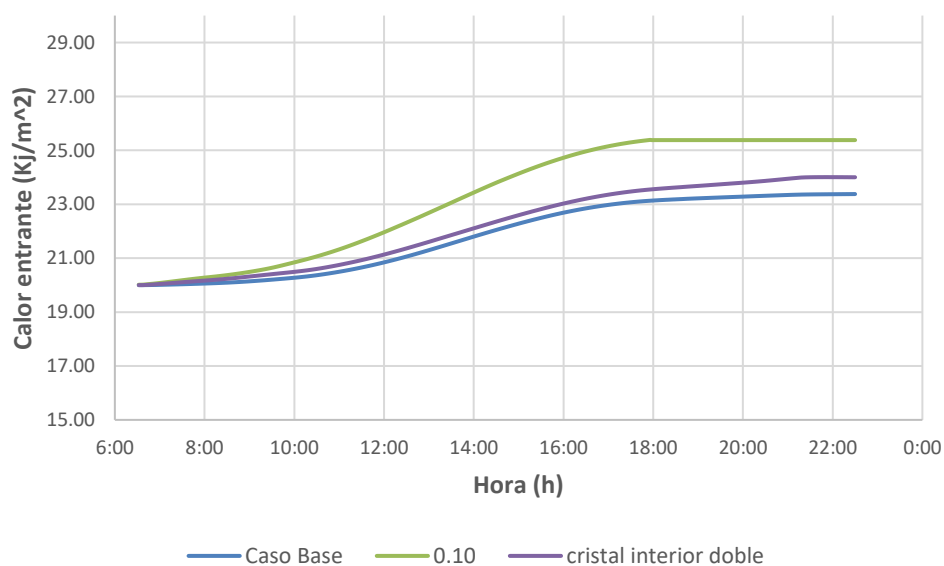


Tabla 24: Temperatura del agua a la salida para un cristal interior doble.

		Temperatura salida agua	Calor absorbido
		(KJ/m ²)	kW
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 11	Vidrio doble	24.01	2.69

Tabla 25: Temperatura del agua saliente del caso vidrio interior doble.

1.18. Resumen de los resultados obtenidos

		Calor entrante	Calor saliente
		(KJ/m ²)	(KJ/m ²)
CASO BASE		-936.167	568.794
CASO 1	r=0.10	-1480.19	116.430
CASO 2	r=0.35	-1625.913	127.854
CASO 3	r=0.60	-1072.833	266.138
CASO 4	R=8000	-851.922	537.258
CASO 5	R=12000	-854.132	602.673
CASO 6	R=16000	-764.919	675.820
CASO 7	V=0.52	-1450.479	591.732
CASO 8	V=0.76	-1078.966	235.703
CASO 9	e=0.05	-1477.364	217.582
CASO 10	e=0.25	-1613.960	237.220
CASO 11	Vidrio doble	-1371.725	114.284

Tabla 26: Calor entrante para los diferentes casos de estudio.

		Temperatura salida agua	Calor absorbido
		(kJ/m ²)	(kW)
CASO BASE		23.38	2.27
CASO 1	r=0.10	25.38	3.61
CASO 2	r=0.35	26.47	4.34
CASO 3	r=0.60	24.04	2.71
CASO 4	R=8000	23.19	8.56
CASO 5	R=12000	22.65	10.67
CASO 6	R=16000	22.13	11.44
CASO 7	V=0.52	22.98	2.00
CASO 8	V=0.76	23.06	2.05
CASO 9	e=0.05	23.59	2.41
CASO 10	e=0.25	23.58	2.40
CASO 11	Vidrio doble	24.01	2.69

Tabla 27: Calor absorbido por el agua que circula por las persianas para los diferentes casos.

Conclusiones

Para el presente estudio hemos podido comprobar que para una un volumen más elevado de la cavidad entre cristales el calor entrante disminuye siendo el más apropiado el caso base. En cuanto al calor absorbido por las persianas y transferidas al agua no tiene mucho peso.

En cuanto a reflectividades, el caso óptimo sigue siendo el caso base pues dispone de una reflectividad del 0.80. De esta manera los rayos solares cuando chocan contra el cristal interior rebotan evitando así un alto valor de ganancia solar. En cuando al calor absorbido por el agua, el mayor es el caso con una reflectividad del 0.35.

En el caso del número de Reynolds hemos podido ver que el calor entrante es menor cuando el agua circula a número de Reynolds altos. Esto tiene sentido puesto que el agua, cuya temperatura es menor que el entorno, se va regenerando más rápidamente absorbiendo más calor. Según la tabla.27 vemos que para número de Reynolds más bajo la temperatura a la salida es mayor, pero no llega a haber mucha diferencia entre ellos. Por lo que el caso $Re=1600$ es una buena opción.

Para el caso del vidrio doble hemos podido observar que no afecta mucho en la ganancia solar. El calor entrante se asemeja a la del caso de un vidrio interior común con una reflectividad de 0.10. Esto nos indica que para condiciones de veranos el vidrio doble no es una buena opción pero sí para aquellos lugares donde el frío es considerable, puesto que, como hemos podido ver en la **Gráfica.1** éste es un buen aislante térmico.

Por último, para el caso de las emisivades del vidrio interior y de los vidrios horizontales y verticales. Según la **Tabla.26** el calor entrante es mayor para ambas combinaciones ($e=0.05$ y $e=0.25$), siendo el caso base $e=0.89$. En cuanto a las temperaturas, el calor absorbido por el agua es ligeramente mayor.

A grandes rasgos vemos que la temperatura que alcanza el agua es más bien escasa, llegando a un incremento máximo de 6 grados, por lo que no conviene llevar a la práctica esta idea.

Futuras mejoras:

1. Del mismo modo se ha dejado para una posterior fase de investigación futuras mejoras en la fachada como por ejemplo la motorización de las persianas. Es decir, la inclinación de éstas irán variando dependiendo de la hora del día para aprovechar al máximo la energía del Sol y adecuándolo a la visibilidad interior que se quiera conseguir.
2. Algunos cambios de estudios que se pueden realizar y ver si se consigue alguna mejora sería variar el tamaño de las persianas o sustituir el aire de la cavidad por un gas más aislante como se ha comentado en el apartado **5.3.5.**, que no hemos podido llevar a cabo debido a la falta de tiempo.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

ASHRAE. (1993). En *Fundamentals Handbook*.

Brundtland World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford, Nueva York: Oxford University Press.

Cáceres. (Octubre de 1996). *Desenbolupament Sostenible*. Barcelona: ISSN 1132-7081.

Colebrook–White equation. (s.f.). *Wikipedia*.

Contreras, E. C. (Julio de 2013). Optimización térmica y energética de la doble fachada acristalada con ventilación mecánica en clima mediterráneo. Barcelona, España: Universidad Politècnica de Catalunya.

Coussirat, M., Guardo, A., Jou, E., Egusquiza, E., Cuerva, E., & Alavedra, P. (2008). *Energy and Buildings. Performance and influence of numerical sub-models on the CFD simulation of free and forced convection in doubled-glazed ventilated façades.*, 9.

CTE. (28 de Marzo de 2006). Código Técnico de la Edificación. *Boletín del Estado*.

Daly, H. (1989). *For the Common Good*. Washington DC.: Benjamin Franklin Lecture.

Directiva 2002/91/CE. (16 de Diciembre de 2002). Obtenido de <http://www.arquitecturasostenible.org/sample-page/directiva-200291ce-del-parlamento-europeo-y-del-consejo-de-16-de-diciembre-de-2002-relativa-a-la-eficiencia-energetica-de-los-edificios/>

DIRECTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO. (25 de Octubre de 2012). Obtenido de <http://www.lamoncloa.gob.es/espana/eh15/industriayturismo/Documents/Directiva%20eficiencia%20energ%C3%A9tica.pdf>

Directiva 89/108/CEE. (21 de Diciembre de 1988). Obtenido de <http://www.madrid.org/bdcm/normativa/PDF/Calidad/Normas%20Tratadas.doc/UEDi01061989.pdf>



- Guardo, A., Coussirat, M., Egusquiza, E., Alavedra, P., & Castilla, R. (27 de November de 2008). *Energy and Buildings. A CFD approach to evaluate the influence of construction and operation parameters on the performance of Active Transparent Façades in Mediterranean climates.*
- Institut Català d'Energia. (2001). *Atlas de radiación solar de Catalunya*. Catalunya: A. Mitjà.
- Isover, & Gobain, S. (2010). *Declaraciones ambientales del producto*. Obtenido de <https://www.isover.es/sites/isover.es/files/assets/documents/dap-oct-2015.pdf>
- Martínez Camarero, C., Baño Nieva, A., & Vigil-Escalera del Pozo, A. (2008). HAcía un nuevo modelo de construcción sostenible. *Revista Ambiental*, 72.
- Modest. (2003). *Radiative heat transfer*. USA: ISBN 9780125031639.
- Pearce, D., Markandya, A., & Barbier, E. (s.f.). *Blueprint for a Green Economy*. London: Earthscan Publications.
- Porcar, J. P. (5th de May de 2015). *Thermo-Fluid Dynamics Optimization with CFD*. Barcelona, España.

Bibliografia complementària

- Takemasa Y., Togari S., Katsuhiro M., Katoh M., Riaoka M., Owada J. (2013) *Evaluation of Calculation Models for Predicting Thermal Performance of Various Window Systems*.
- Pareja Aparicio M., (2005) *Radiación Solar y su aprovechamiento energético*. Marcombo, ediciones técnicas.
- Sánchez Juárez E., Manuel Gómez Soberón J., *Diseño Sostenible: Adaptabilidad y Deconstrucción* (Junio 2011, Master en Edificación: Trabajo de fin de master). Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona.
- Harry Poirazis, *Double Skin Façades* (2006) A Literature Review. A report of IEA SHC Task 34 ECBCS.
- Salvador Boada i Xairó, (Barcelona, Septiembre 2013) Trabajo final de Máster. *Los límites del vidrio (aproximación analítica de los límites de las prestaciones energético-lumínica del vidrio)*.
- John Straube. (2007) *A Critical Review of the Use of Double Façades for Office Buildings in Cool Humid Climates*. Department of Civil Engineering and the School of Architecture at the University of Waterloo.

Sofía Dómina, Juliana. (Abril 2010) *Las tesinas de Belgrano*. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Belgrano.

Yunus A. Çengel, Afschin J. Ghajar. *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. Cuarta Edición.

Anexo

A1. Resistencia térmica de un cristal común

En los cálculos de transferencia de calor se menosprecia la resistencia térmica de los cristales simples. Esto se puede ver en el siguiente ejemplo:

Considerando un vidrio simple formado por las características que se muestran en la siguiente tabla:

Propiedades del cristal	
e (mm)	6
k (W/m · °C)	0.92
α	0.15
ρ	0.07
τ	0.78
h_i (W/m ² · °C)	8.29
h_o (W/m ² · °C)	34.0

Tabla 28: Propiedades físicas y ópticas de un vidrio común.

Y aplicando red de resistencias térmicas podemos hallar la resistencia total del conjunto:

$$R_{total} = R_{exterior,conv} + R_{vidrio,cond} + R_{interior,conv} = \frac{1}{h_e} + \frac{L_{vidrio}}{k_{vidrio}} + \frac{1}{h_i} \quad (\text{Ecuación 0.1})$$

Sustituyendo los valores tenemos:

$$R_{total} = \frac{1}{34.0 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{0.003 m}{0.92 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{8.29 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 0.029 + 0.003 + 0.121 = 0.1533 \frac{^\circ C}{W}$$

Como se puede ver en este ejemplo la resistencia que ofrece el vidrio es menor respecto al total.

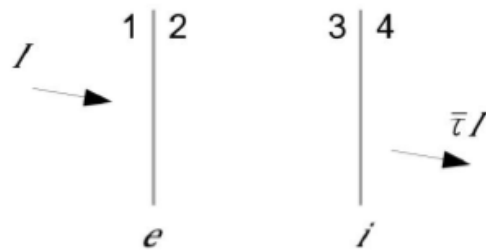
$$\frac{R_{vidrio}}{R_{total}} = 2.0\%$$

Es decir, la resistencia que ofrece el vidrio representa tan solo el 2% de la resistencia total.

***Nota:** dado que la resistencia que presentan los vidrios simples de una sola hoja es tan baja y despreciable, se considera que la temperatura superficial de ambas caras (interior y exterior) son iguales.

A2. Determinación de las propiedades ópticas entre vidrios

Cálculo de la transmitancia global



Siguiendo la radiación incidente, podemos estudiar diferentes reflexiones(n), que corresponde el viaje que realiza esta radiación:

Nº reflexiones	Transmisión vidrio exterior	Reflexión de la cara 3	Reflexión de la cara 2	Transmisión vidrio interior
1	τ_o			$\tau_o \tau_i$
2		$\tau_o \rho_3$	$\tau_o \rho_3 \rho_2$	$\tau_o \rho_3 \rho_2 \tau_i$
3		$\tau_o \rho_3 \rho_2 \rho_3$	$\tau_o \rho_3 \rho_2 \rho_3 \rho_2$	$\tau_o \rho_2^2 \rho_3^2 \tau_i$
4		-	-	$\tau_o \rho_2^3 \rho_3^3 \tau_i$

De manera que la suma total de la transmisión del vidrio interior queda:

$$\bar{\tau} = \tau_o \tau_i + \tau_o \rho_3 \rho_2 \tau_i + \tau_o \rho_2^2 \rho_3^2 \tau_i + \tau_o \rho_2^3 \rho_3^3 \tau_i + \dots$$

Aplicando simplificación de iteraciones repetitivas queda:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_o \tau_i}{1 - \rho_2 \rho_3} \quad (\text{Ecuación 0.2})$$

A3. Números adimensionales

Número de Reynolds: Número adimensional que indica la relación que hay entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas.

$$Re = \frac{\rho c L_c}{\mu} \quad (\text{Ecuación 0.3})$$

Número de Grashof: Es la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido. En otras palabras, es lo mismo que el número de Reynolds pero aplicado a la convección natural. Proporciona el criterio principal en la determinación de si el flujo del fluido es laminar o turbulento en la convección natural.

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \quad (\text{Ecuación 0.4})$$

- Si $Gr_L > 10^9$ estamos en flujo turbulento.
- Si $Gr_L < 10^9$ estamos en flujo laminar.

Número de Nusselt: El número de Nusselt es un valor que nos indica la relación que hay entre la transferencia de calor por convección natural y por conducción en un fluido que esté en movimiento o no. En otras palabras, cuanto mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la transferencia de calor por convección. Si $Nu = 1$ indica que la transferencia de calor es por conducción pura (el fluido permanece inmóvil).

$$Nu = \frac{h L_c}{k} \quad (\text{Ecuación 0.5})$$

Número de Prandtl: Es la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica. Toma valores que van desde 0.01 para los metales líquidos hasta más de 100.000 para los aceites pesados. En otras palabras, los valores pequeños de Pr indican que el calor se difunde muy rápidamente, mientras que para valores superiores con lentitud.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (\text{Ecuación 0.6})$$

Número de Rayleigh: Es la relación que hay entre las fuerzas de flotabilidad, de las difusividades térmicas y de la cantidad de movimiento.

$$Ra_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu \alpha} = Gr_L Pr \quad (\text{Ecuación 0.7})$$

A4. Determinación de la velocidad del agua en las persianas

Para determinar la velocidad del agua que circula a través de las persianas dependiendo del número de Reynolds se ha de seguir los siguientes pasos:

1. Por la ecuación de Reynolds ((Ecuación 0.3), despejamos la velocidad.

$$c = \frac{Re \mu}{\rho L_c} \quad (\text{Ecuación 0.8})$$

2. Donde L_c se refiere en este caso a diámetro equivalente de la tubería (D_h). Dicho diámetro para una sección rectangular se expresa como:

$$D_h = \frac{2 a b}{a + b} \quad (\text{Ecuación 0.9})$$

Siendo a y b los costados del rectángulo.

Cálculo de la velocidad para diferentes números de Reynolds

A continuación se calculan las velocidades para cada número de Reynolds siendo el Caso_BASE Re=2000. Los datos fueron extraídos de la **Tabla 12**: Propiedades físicas de los fluidos.

$$D_h = \frac{2 a b}{a + b} = \frac{2 \cdot 0.15 \text{ m} \cdot 0.01 \text{ m}}{0.15 \text{ m} + 0.01 \text{ m}} = 0.01875 \text{ m}$$

$$c (Re = 2000) = \frac{Re \mu}{\rho D_h} = \frac{2000 \cdot 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.01875 \text{ m}} = 0.10718 \text{ m/s}$$

$$c (Re = 8000) = \frac{Re \mu}{\rho D_h} = \frac{8000 \cdot 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.01875 \text{ m}} = 0.42872 \text{ m/s}$$

$$c (Re = 12000) = \frac{Re \mu}{\rho D_h} = \frac{12000 \cdot 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.01875 \text{ m}} = 0.64301 \text{ m/s}$$

$$c (Re = 16000) = \frac{Re \mu}{\rho D_h} = \frac{16000 \cdot 0.001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}}{998.2 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.01875 \text{ m}} = 0.85744 \text{ m/s}$$

A5. Determinación del calor absorbido por el agua en las persianas.

Para hallar este valor se hace uso de la fórmula 5.46:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (W)$$

Siendo \dot{m} ,

$$\dot{m} = c \rho A$$

Donde A es el área de la sección de las persianas ($A=0.15 \times 0.01 \text{ mm}^2$), y c hace referencia a la velocidad del fluido determinada en el apartado anterior. Tomando los valores de la **tabla 12**, y los valores del caso base:

$$\dot{Q} = 0.10718 \frac{m}{s} \cdot 998.2 \frac{kg}{m^3} \cdot (0.15 \cdot 0.01) mm^2 \cdot 4.182 \frac{kJ}{kg \cdot K} (23 - 20) = 2.27 \text{ kW}$$

A6. Costes del proyecto de Ingeniería

Actividades	Tiempo dedicado (días)	Horas totales (h)	Coste (€/h)	Coste total (€)
Investigación (Bibliografía)	40	160	20	3200
Organización del trabajo	15	60	20	1200
SolidWorks (entrenamiento y planos)	2	8	25	200
Ansys Meshing	30	120	30	3600
Ansys Fluent	40	160	30	4800
Análisis Matemático (investigación + comprobación)	30	120	20	2400
TOTAL	157	628		15400

***Nota:** las horas dedicadas por día son de 4h/día.

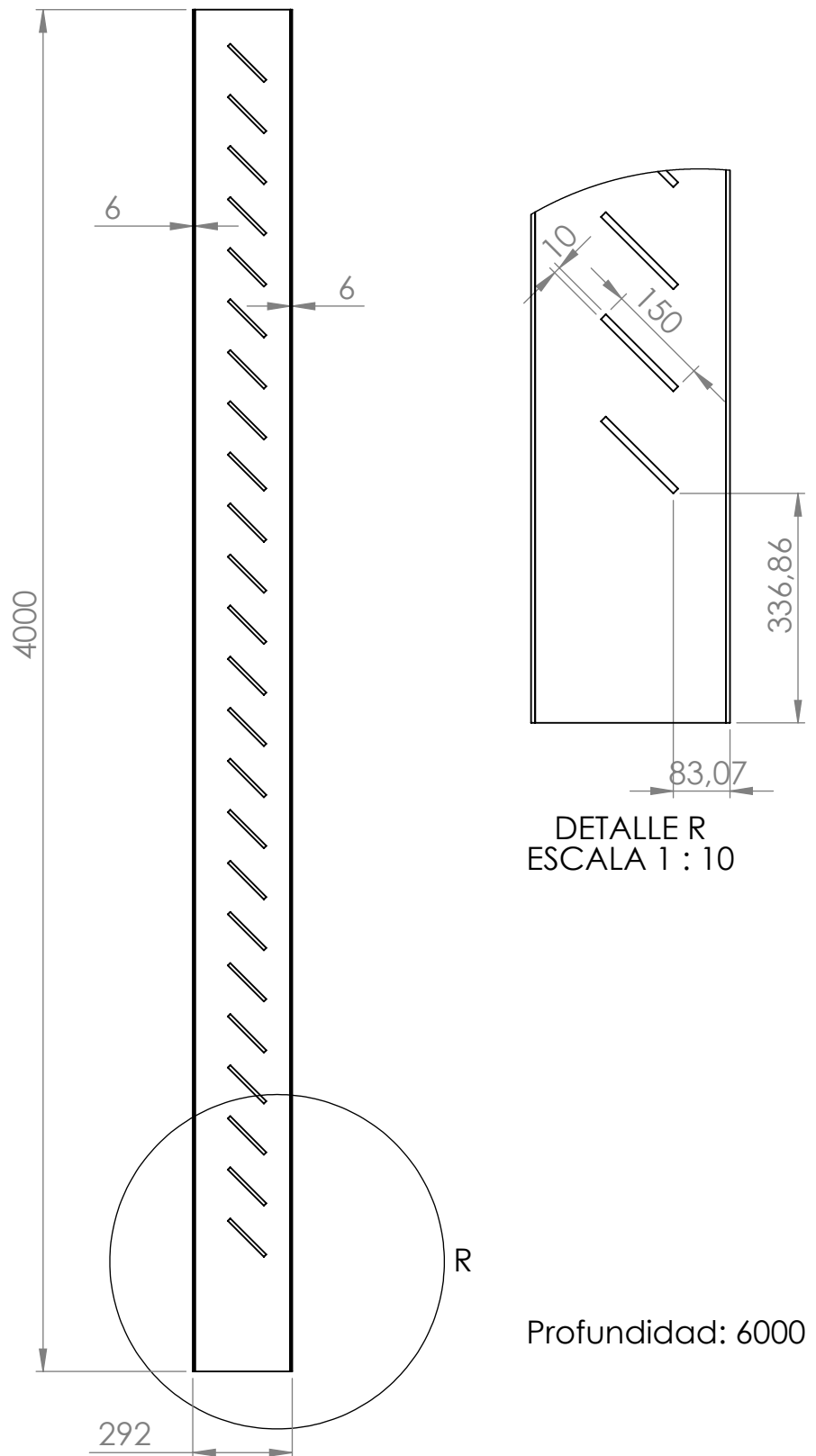
PLANOS

Plano del Caso Base (pág. 82)

Plano del volumen 2 (pág. 83)

Plano del volumen 3 (pág. 84)





Título del proyecto:

Uso de la radiación Solar en
DFA para la reducción de
cargas de enfriamiento

Nombre del Plano: Doble fachada acristalada

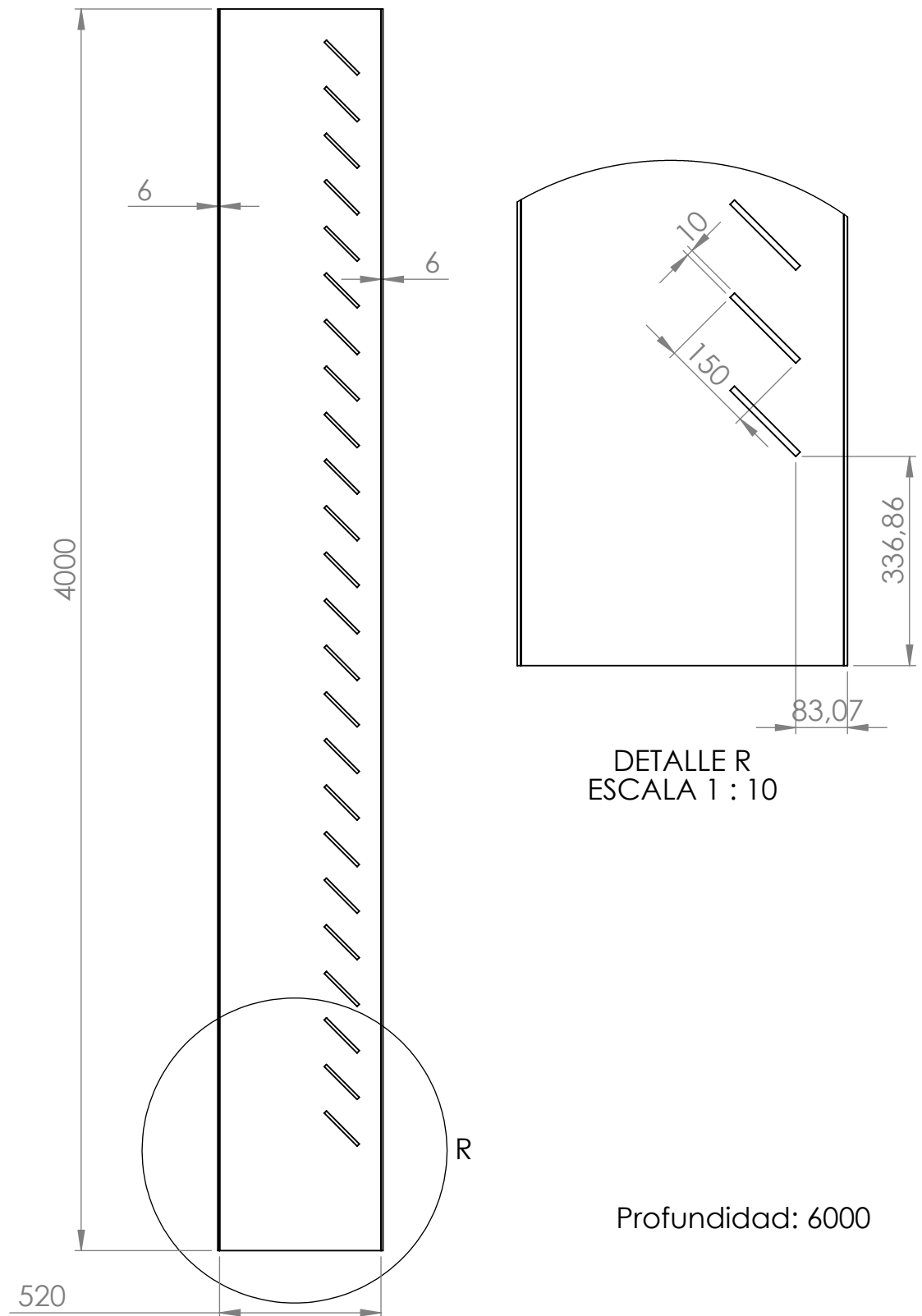
Número del Plano: 1

Dibujado: Anthony Raúl Ravello Cortez (09/01/2016)

Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta (09/01/2015)

Comentarios: medidas en mm

Escala 1:20



Título del proyecto:

Uso de la radiación Solar en
DFA para la reducción de
cargas de enfriamiento

Nombre del Plano: Doble fachada acristalada V=0.52

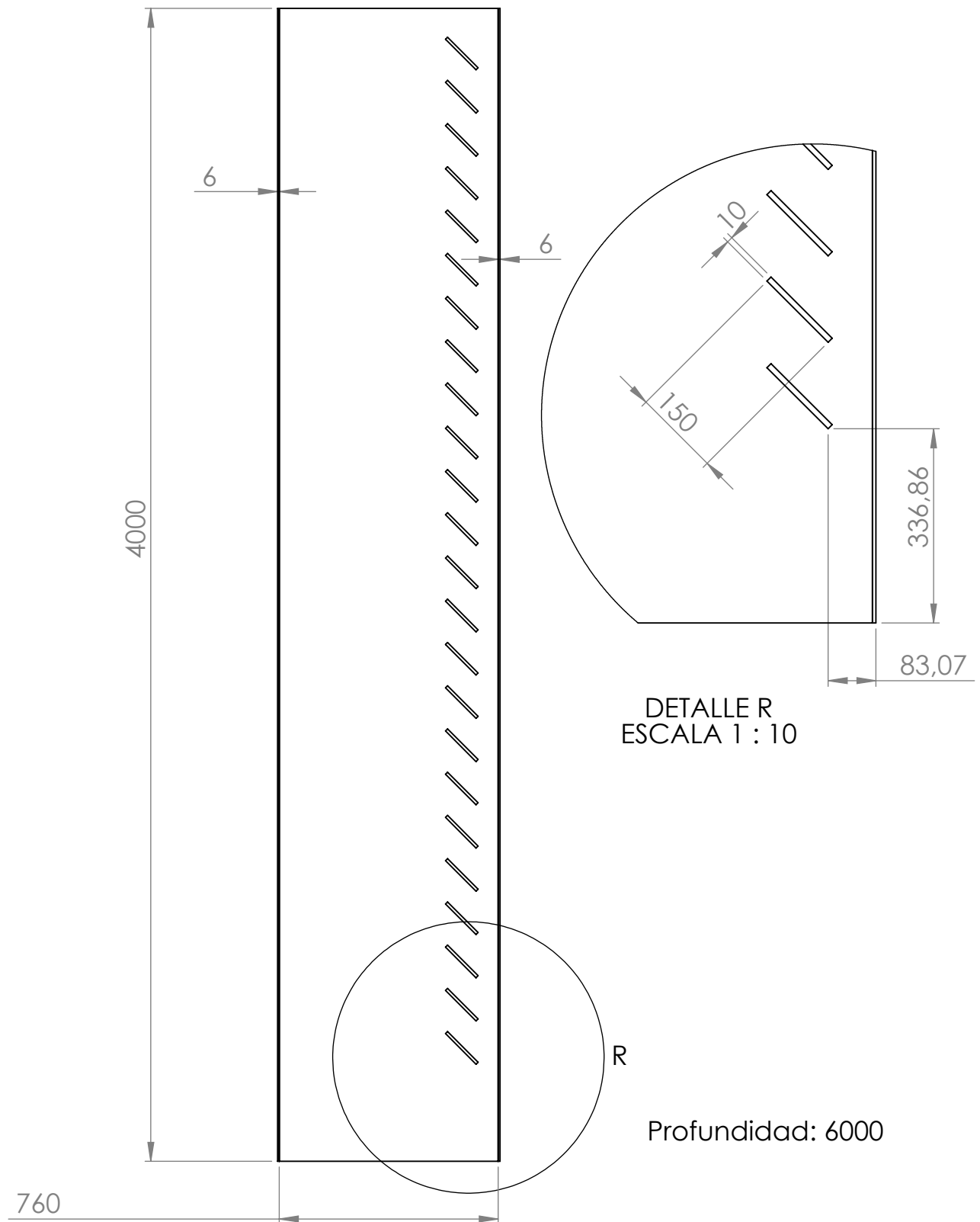
Número del Plano: 2

Dibujado: Anthony Raúl Ravello Cortez (09/01/2016)

Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta (09/01/2015)

Comentarios: medidas en mm

Escala 1:20



Nombre del Plano: Doble fachada acristalada V=0.76

Título del proyecto:

Número del Plano: 3

Uso de la radiación Solar en
DFA para la reducción de
cargas de enfriamiento

Dibujado: Anthony Raúl Ravello Cortez (09/01/2016)

Comprobado: Alfredo Guardo Zabaleta (09/01/2015)

Comentarios: medidas en mm

Escala 1:20